

**Modelação e Auxílio ao Projecto de Estrutura  
de Autocarros com base em Software de Elementos Finitos  
Realizado na CaetanoBus**

*Carlos Jorge Faia Pereira: [em00120@fe.up.pt](mailto:em00120@fe.up.pt)*

**Relatório do Projecto Final do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. Paulo Tavares de Castro

Orientador na CaetanoBus: Eng. Filipe Fernandes



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro de 2008







## **Resumo**

Este estudo trata a modelação por elementos finitos de um autocarro com o propósito de apoiar ao desenvolvimento em fase de projecto na CaetanoBus.

O estudo realizado engloba vários aspectos, tais como modelação da estrutura de um autocarro considerando os seus componentes de forma a validar um modelo. O caso de estudo simula uma situação real.

Inicialmente foi realizado com base num modelo idêntico em elementos finitos existente, um pré estudo de apoio ao projecto auxiliando a decisão da escolha do tipo de perfil a utilizar no novo modelo. Foram feitos ainda, um estudo de uma ligação entre perfis resistentes, pilar ao estrado, estudo das tensões no estrado do modelo já existente, um estudo sobre o comportamento do vidro a fim de determinar as suas características físicas, nomeadamente o módulo de Young.

Foi estudada a influência da utilização de perfis finos com grande rigidez nos pilares, tendo em conta aspectos construtivos e fenómenos de fadiga.

Foi feito um estudo de extensometria a fim de validar um modelo em elementos finitos utilizando um modelo real.

Foram comparados resultados tendo em conta a utilização de duas formas diferentes de calcular o módulo de Young. Determinação das tensões máximas as nos pilares. Comparação dos níveis de tensões no modelo antigo (Carris) e o novo modelo em fase de projecto, comparando também as tensões máximas nos pilares.

Foi examinada a influência do aumento do número de passageiros, simulando uma situação comum de excesso de passageiros, bem como as suas consequências devido ao aumento de tensões.

Dos resultados há que salientar as baixas tensões resultantes na extensometria, a diminuição do módulo de Young com o aumento da espessura do vidro, bem como uma solução para uma ligação pilar-estrado diminuindo o factor de concentração de tensões. Os perfis escolhidos nos estudos preliminares (Capítulo 3) revelaram-se vantajosos para a modelação contribuindo para que as tensões máximas sejam as dos pilares.



## **Modelling and Support to Project of a Bus Structure based on the Finite Element Software**

### **Abstract**

This study concerns the finite element modelling of a bus, conducted as a contribution to the development phase of a new vehicle of the firm CaetanoBus.

The work performed, consisting of a simulation of a real product being developed, using the finite element method, involves several interrelated parts as the modelling of the structure and its components.

An initial, preliminary study was conducted using an available finite element model of another vehicle of the same type, as a contribution to the identification the types of profiles and tubes to be used in the new product. The connection between tubes, and between pillars and platform, and the stresses in the platform of the already existing model were also analysed in this initial stage, which also included an analysis of the glass components seeking to obtain a suitable Young's modulus to be used in the finite elements simulations.

The influence of the use of thin walled tubes, and of the stiffness of the pillars was studied, taking into account manufacturing aspects and likely damage behaviour.

An attempt to calibrate the results of the numerical model with experimental data was made using extensometry.

Two different procedures to evaluate the Young's modulus were used and compared. The maximum stress in the pillars was computed, and the stresses in an earlier vehicle of this type, used by the firm Carris, were compared with the values obtained for the new vehicle.

The consequences in terms of stress state of increasing the number of passengers were studied, simulating a situation of over crowding above the specified limit.

The extensometry results proved to be of the same order of magnitude but lower than the predicted finite element values. The Young's modulus to be used for the glass components proved to be dependent on the thickness of that material, and a solution for the connection pillar/platform reducing stress concentration factor was proposed. The profiles chosen in the preliminary study mentioned above proved to be adequate, contributing to the occurrence of maximum stresses in the pillars.





## **Agradecimentos**

Agradeço a todos os que contribuíram directa ou indirectamente para a evolução deste estudo, mesmo que muitos não se tenham apercebido.

Em especial quero agradecer ao Pessoal da DGE, agora ENG, da empresa CaetanoBus pela ajuda e boa vontade que demonstraram, mas sobretudo pela simpatia com que me receberam.

Quero ainda agradecer em especial ao Engenheiro Filipe Fernandes, orientador do meu estágio na CaetanoBus, pelos conhecimentos que me transmitiu e pela forma como contribuiu para a minha integração.

Quero ainda agradecer aos que contribuíram para o estudo de extensometria pois sem eles esse estudo não teria sido possível:

Dr. Jaime Monteiro,  
Prof. Mário Vaz,  
Prof. Paulo Tavares de Castro,  
Eng. Valentin Richter-Trummer.

Quero ainda agradecer aos Professores Lucas Silva e Lúcia Dinis pela disponibilidade.



# Índice

Índice .....	1
1 - Introdução.....	3
Parceria CaetanoBus – FEUP .....	4
Abordagem .....	4
Objectivos.....	5
Investigação e Desenvolvimento .....	6
Caetano Bus.....	8
2 - Estado da Arte .....	9
Segurança em Autocarros.....	9
Elementos Finitos .....	10
Um ataque terrorista .....	11
Modelação de um comboio articulado .....	13
Estudo do diferencial de uma camião por MEF .....	14
Elementos Finitos Aplicado a Autocarros .....	15
Teste de capotamento utilizando o LS-DYNA.....	16
Estudo do impacto lateral num autocarro usando o ANSYS/LS-DYNA.....	17
3 - Caso de estudo.....	19
Software Utilizado.....	20
Estudos Preliminares .....	23
Reparação – Pilares Fracturados.....	23
Auxílio ao Projecto.....	24
Pilares .....	24
Alongamento .....	25
Resultados.....	26
Estudo da Ligação de um Pilar ao Estrado .....	27
Distribuição de Massas.....	30
Módulo de Young cola – vidro.....	32
Módulo de Young Utilizado .....	35
4 - Metodologia de Trabalho .....	37
Validação do Modelo.....	38
Extensometria .....	39
Modelação – Urbano .....	44
Chassis.....	44
Modelação Chassis .....	45
Alongamento .....	46
Estrado .....	47
Pavimento .....	47
Painéis.....	48
Tejadilho.....	49
Pecolite .....	50
Sanca.....	51
Frente .....	51
Traseira .....	52
Bancos .....	52
Almofada Traseira .....	54
Chapeamento exterior.....	54
Blindagens Frente e Motorista.....	55
Depósito de Combustível .....	56

Portas .....	56
Ar condicionado .....	56
Passageiros .....	57
Lotação de Pé – 72 Passageiros .....	57
Lotação Sentado – 29 Passageiros .....	58
As condições fronteira .....	59
Validação do modelo .....	59
Validação do chassis .....	59
Módulo da Frente .....	60
Módulo Traseiro .....	60
Grupos G1 e G2 .....	60
Elementos e Pesos .....	61
Pesos e número de elementos .....	62
Distribuição de Massa por Eixo .....	63
Grupo G1 .....	63
Grupo G2 .....	63
5 - Resultados .....	67
Urbano .....	67
Binómio Cola-Vidro com maior Rigidez (Módulo 1) .....	67
Binómio Cola-Vidro com menor Rigidez (Módulo 2) .....	69
Nível de Tensões nos Pilares, Módulo 1 e Módulo 2 .....	70
Comparação do nível de tensões dos Módulos 1 e Módulo 2 .....	72
Modelo Carris .....	74
Comparação entre os níveis de tensão entre o Urbano (Módulo 2) e da Carris (Ensaio3) .....	75
Acções de Melhoria .....	77
Acção 1 – Elementos do degrau .....	77
Acção 2 – Ligações entre o estrado e o chassis .....	78
Resultados do nível de tensões .....	78
Situação Possível – Excesso de Passageiros .....	79
Discussão de Resultados .....	83
6 - Conclusões .....	87
Referências Bibliográficas .....	89
Bibliografia .....	90
Anexos .....	92
O Trabalho de alguns recentes alunos finalistas da FEUP na DGE (ENG) .....	92
António Morais (2003-2004) .....	94
André Ramos (2006-2007) .....	100
Tiago Lopes (2006/2007) .....	110
Pedro Oliveira (2003) .....	110
Referências Bibliográficas .....	112

## 1 - Introdução

A produção de veículos de transporte sofreu grande evolução ao longo dos tempos. Os primos afastados dos conhecidos autocarros de hoje eram fabricados



**Figura 1 – Autocarro de Estocolmo, 1899**

praticamente em madeira e algumas partes metálicas. Por exemplo, o primeiro autocarro a circular em Estocolmo remonta a 1899, e a sua utilização limitada a apenas oito dias deveu-se à enorme barulheira provocada pelas suas rodas de madeira revestidas a ferro rolando no pavimento; só em 1922 é que um autocarro voltaria a operar nesta capital.

Entretanto os autocarros sofreram grandes evoluções, tendo sido grande parte da estrutura em madeira substituída por perfis e chapas de aço, por revestimentos plásticos e compósitos, entre outros materiais. A evolução ao longo dos tempos permitiu autocarros mais seguros, leves, duradouros que são o resultado de mais de 100 anos de aperfeiçoamento de métodos de construção, melhoria a nível de materiais utilizados e utilização de novas tecnologias que permitem aumentar a segurança e o conforto.

A investigação e desenvolvimento no âmbito da engenharia tornam-se cada vez mais importantes na estratégia de uma empresa. Uma empresa ciente de uma política inovadora saberá utilizar os conceitos de engenharia para o cálculo de estruturas utilizando novas tecnologias poderosas apoiadas por computadores que todos os dias surgem no mercado, mas nunca se abstendo de considerar as limitações das novas aplicações.

As preocupações ambientais na pequena casa em que vivemos, chamada Terra, têm vindo a ser cada vez mais notórias e em consequência a diminuição da libertação de gases para a atmosfera e a reciclagem de materiais são conceitos cada vez mais importantes conduzindo a um comportamento das empresas e das pessoas em geral mais amigável ao ambiente.

Assim as empresas construtoras de veículos de transporte, quer de passageiros quer de mercadorias ou mesmo mistos tem vindo a tentar comercializar veículos menos poluentes, mais económicos portanto mais leves sem diminuir o seu nível segurança passiva bem com a sua durabilidade, aumentando assim a qualidade e competitividade dos seus produtos.



**Figura 2 – Autocarro experimental a funcionar a hidrogénio, Porto, 2004**

## **Parceria CaetanoBus – FEUP**

O Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, na opção de Construções Mecânicas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) concede a oportunidade de realizar os Projectos de Fim de Curso em Empresas por forma a aumentar o nível de competitividade e permitir uma integração mais capaz dos seus alunos no mercado de trabalho.

Surge assim a oportunidade de realizar o Projecto de Fim de Curso na Empresa Salvador Caetano, nomeadamente no departamento DGE, (actualmente ENG), da CaetanoBus, com o objectivo de modelar carroçarias que fabrica bem como chassis comprados a diversas empresas tais como SCANIA, Mercedes ou MAN usando o método dos elementos finitos.

É apresentado em Anexo uma referência concisa a diversos trabalhos recentes de alunos finalistas de Engenharia Mecânica da FEUP no departamento DGE da CaetanoBus, realizados com orientação do Engenheiro Filipe Fernandes e co-orientação na FEUP do Professor Paulo Tavares de Castro.

## **Abordagem**

Neste tipo de estudo é extremamente importante o conhecimento da empresa bem como da sua dinâmica de trabalho. O conhecimento de novos softwares, conceitos, e dos objectivos e organização de trabalho enriquece toda a experiência de um estágio.

O conceito de estágio leva-nos muito além do mundo estudantil da faculdade em que zero é zero e vinte é difícil de alcançar. Um estágio em empresa oferece a oportunidade de conhecimento de uma realidade muito diferente e única que todos deveriam ter a possibilidade de obter. A diferença entre a faculdade e o mundo da engenharia é sem duvida a dificuldade em transpor para a realidade conceitos que nem sempre podem ser aplicados. As bases aprendidas na faculdade ganham mais sentido aumentando a articulação entre conceitos. Soldadura, fadiga, questões de processo ou mesmo montagem, características físicas dos materiais, interacção de materiais, custos são muitos dos temas abordados em todo o processo de desenvolvimento e construção de um novo produto.

O desenvolvimento de novos produtos, nomeadamente de um autocarro urbano implica um vasto conjunto de questões que se interligam. Na verdade o projecto de um autocarro resulta do acordo entre cliente e construtor acerca de questões como cor, dos bancos, se tem ar condicionado ou se tem o pára-brisas dividido em duas partes. Resulta ainda também da imposição do fornecedor do chassis ou mesmo do regulamento europeu ECE R66, [1].

A relação interpessoal com todos os elementos que trabalham nas empresas é muito importante. Eles são uma fonte importante de conhecimento pelos anos de experiência que possuem, facilitando o trabalho de modelação. Os designers conhecem os modelos, perfis a utilizar, e de quase todos os “cantos da casa”, dando muitas ajudas na leitura e interpretação de desenhos.

Um dos factores positivos desta passagem foi a possibilidade de aprender também com a ajuda do André Ramos, que continuou o seu estágio de 2006/07 na CaetanoBus. Foi importante pois permitiu tirar benefícios a vários níveis, introduzindo-

me na filosofia do trabalho e aproximando-me da empresa dando-me conhecimento do autocarro em si baseado em metodologias e conhecimentos já adquiridos, nomeadamente na análise de desenhos técnicos individuais e de conjunto, análise de tabelas técnicas, e maior envolvimento na dinâmica de trabalho.

## **Objectivos**

O Estágio tem como objectivo interligar os alunos de faculdades com o mundo do trabalho. Assim a passagem pela CaetanoBus tem objectivos bem definidos a nível de estudo. Os conhecimentos profissionais e pessoais, no meu entender, são extremamente valorizados com a realização de um projecto em empresa.

Terá por isso os seguintes propósitos:

Estudar um modelo, em fase de desenvolvimento, de um autocarro urbano. Passará por modelar o chassis (módulo da frente e trás) e estrutura resistente composta por estrado, painel esquerdo e direito, tejadilho, frente e traseira de um autocarro. A introdução de componentes, ou seu equivalente é uma consideração muito importante. É necessário considerar, determinar e simplificar elementos não estruturantes tais como portas, ar condicionado ou o depósito de gasóleo.

Será também auxiliar o desenvolvimento testando soluções num modelo já estudado por A. Morais, [2], de forma a melhorar o produto mesmo antes da sua comercialização, ou seja, durante a sua fase de projecto ou mesmo construção.

Aprender a trabalhar com o software de desenho existente na DGE da CaetanoBus o CADD5 e modelar a estrutura de um autocarro por meio de uma aplicação do CADD5, o StressLab. Permitirá a modelação por elementos finitos com elementos de viga (beam) e tipo casca (shell), bem como a execução do cálculo. Após a análise o objectivo principal será: eliminar zonas consideradas mais críticas, reforçando-as ou alterando ligeiramente o desenho estrutural.

Melhorar os conhecimentos do software Cosmos, ferramenta do SolidWorks que será utilizada para o cálculo das características físicas tais como Área, Inércia à Flexão, mas também para cálculos de zonas específicas localizadas caso o nível de tensões o justifique.

Apreender e tentar compreender a dinâmica de trabalho de uma grande empresa, a relação humana e profissional com as pessoas que nela trabalham.

Aumentar os conhecimentos a nível profissional na área dos elementos finitos bem como fomentar a interligação de conceitos e áreas da Engenharia Mecânica.

## Investigação e Desenvolvimento

A inovação é uma das chaves para o sucesso competitivo das empresas e também para o país. O desenvolvimento faz parte de um ciclo de inovação e investigação, que vai desde uma ideia até à concepção do produto comercial. A capacidade de inovar de uma empresa depende da sua capacidade de manobrar bem o seu desenvolvimento.

De uma forma geral a instigação e o desenvolvimento estão inseridos num ciclo de interacção ente lucros, I&D, vendas, qualidade de produtos, entre outros.

Outras áreas de importância no desenvolvimento de novos produtos abordam questões ambientais, de produção, e que fim dar ao produto quando se atinge o seu limite de utilização.

A investigação envolve todas a área da produção ou melhoramento de um produto, envolvendo:

Engenharia;  
Tecnologias de transformação;  
Produção;  
Qualidade e ensaios.

É necessário compreender que este ciclo começa com a Engenharia (desenvolvimento), e que a inovação depende da ligação com as restantes áreas necessárias à concepção. A fase de desenvolvimento começa um com conceito que passa depois a ser um especificação, passando depois ao papel. É como quando uma ideia cresce definindo-se para que serve, e como e que se vai construir.

O grande problema muitas vezes surge na oposição do que se pretende fazer e no que se pode fazer. Na verdade um projecto tão vasto como é a construção de um autocarro depende de tantos factores que avanços e recuos são circunstâncias normais de evolução.

Por um lado a parte estrutural (carroçaria) da qual posso falar em melhor, resulta de tantos factores tais como do chassis, do regulamento ECE66 que define arcos principais e reforços da estrutura por exemplo. Por outro lado o Cliente define tantos aspectos desde a escolha dos bancos, o número de lugares, a existência ou não de ar condicionado ou mesmo o número de litros de gasóleo que o depósito deverá ter.

Tendo isso em conta o projecto sofre inúmeras alterações tornando-se necessário estar em permanente contacto com os responsáveis do desenvolvimento, pois corremos o risco do desenho ser alterado sem darmos por ela.

O processo de desenvolvimento sofre assim avanços e recuos que para um cálculo estrutural podem ser significativos. É importante muitas vezes antecipar e utilizar um método de trabalho que permita alterar facilmente a estrutura resistente ou os componentes simplificados.

A qualidade dos produtos, bem como o preço e um histórico de produto são factores determinantes na venda de qualquer produto. Os autocarros não são excepção, sendo que o desenvolvimento é uma das chaves da concepção de produtos mais seguros, económicos, e de qualidade. Esse desenvolvimento vai desde a concepção da estrutura resistente, revestimentos exteriores e interiores, bancos mais leves em cumprimento das normas de segurança impostas pelo ECE R66.



A Investigação e Desenvolvimento têm ainda um outro papel muito importante, sendo o responsável pela criação de conhecimento, “know-how” que permite a empresas de topo liderar mercados de vendas. Existe pois uma ligação entre Investimento Desenvolvimento, Lucro e os nossos elementos finitos, pois a sua aplicação conduz no geral a um produto mais seguro, barato e com maior Qualidade.



Figura 3 – Triângulo Investimento, Lucro, Formação Contínua

A utilização de elementos finitos requer o investimento inicial na compra de software, geralmente uma soma avultada, mas que poderá ajudar a minimizar custos de desenvolvimento por exemplo num protótipo. Imagine-se que se pretende fazer um teste de capotamento. Visto que existe software capaz de o simular, se uma empresa tiver que certificar alguns modelos provavelmente poupará uma boa soma de dinheiro. No entanto é necessário alguém que o saiba manipular e acima de tudo que consiga interpretar os resultados provenientes da análise em elementos finitos. Esse é um dos custos associados mas que gera a criação de “know-how” levando as empresas a uma cota de mercado importante, mantendo-se ao nível e se possível acima da concorrência.

## Caetano Bus

### A história

As origens da CaetanoBus remontam a 1946, ano em que nasce a empresa Martins, Caetano & Irmão, Lda., para fabrico de carroçarias de autocarros com estrutura totalmente em madeira. Em 1951 a empresa passa a designar-se apenas por Martins & Caetano. Os métodos de construção mudam e a empresa passa a utilizar uma nova técnica mista de construção de carroçarias com perfis de aço e madeira. Posteriormente o fabrico passa a ser totalmente metálico, ao melhor estilo e nível europeu.

Em 1961 a Martins & Caetano estabelece um acordo tecnológico com a empresa inglesa Metro Cammell Weymann. A empresa introduz em Portugal técnicas inovadoras de construção, que lhe trouxeram fama de produtor de qualidade acima da média.

Em 1966 a firma passa a denominar-se Salvador Caetano – Indústrias Metalúrgicas e Veículos de Transporte, SARL. A Salvador Caetano lança-se no mercado da exportação, tendo muitos dos seus veículos passado a circular na Grã-Bretanha. As primeiras exportações de autocarros ocorreram em 1967.

Em 1968 a Salvador Caetano passa a representar a Toyota. A empresa passou a ter uma outra actividade para além da produção de autocarros. Nos anos 80 a empresa diversifica as áreas de negócio. São realizados investimentos nas áreas da construção civil, imobiliário, banca, comércio, pesca e na prestação de diversos serviços.

Nos finais dos anos 90 a produção de autocarros representa 9% das receitas totais do grupo Salvador Caetano.

No início do novo milénio a área de produção de autocarros é autonomizada e criada a CaetanoBus – Fabricação de Carroçarias, SA. A CaetanoBus resulta de uma parceria estratégica entre o grupo Salvador Caetano, através da Saltano SGPS, e a EvoBus, do grupo Daimler Chrysler, formalizada em Setembro de 2001. A actividade da CaetanoBus inicia-se em Janeiro de 2002.

No ano de 2007 o volume de vendas ultrapassa as 600 unidades, representando o modelo Cobus quase 50% das vendas.



Figura 4 -Modelo da década de 60, S. Caetano



Figura 5- Cobus 3000, CaetanoBus

## **2 - Estado da Arte**

### ***Segurança em Autocarros***

Um dos critérios para a construção de autocarros é a segurança. Os autocarros citadinos “Citybus” são autocarros fabricados para operar exclusivamente dentro de cidades, vilas ou arredores, as também chamadas zonas metropolitanas. A segurança é um importante factor não só social mas também económico. A União Europeia impõe regulamentações e directivas relativas, por exemplo, à construção estrutural e aos bancos utilizados. O aumento de segurança tem como consequência a diminuição dos danos para os ocupantes, menores danos sociais, menor impacto na imagem da empresa construtora de carroçarias e menores custos para a indústria seguradora.

O regulamento ECE 66 confere especial atenção aos autocarros de cidade devido aos passageiros viajarem muitas vezes de pé, resultando muitas vezes feridos como consequência de projecção dos passageiros contra os revestimentos interiores devido a travagens de emergência ou mesmo a embates com outros veículos. A aplicação de elementos finitos bem como um melhor desenho construtivo podem contribuir para um aumento da segurança. Está provado (análise estatística) que um acidente de rollover de autocarro não ocorre muitas vezes e provoca por isso menos vítimas no entanto mais graves. Um choque frontal ocorre mais vezes e provoca mais feridos mas menos graves. Geralmente nas cidades o tipo de acidente que ocorre é muitas vezes de embates, mas geralmente a baixa velocidade, havendo registos de alguns acidentes graves, como o caso de um veículo da empresa Resende há uns anos atrás.

É necessário compreender que durante um teste de capotamento o posicionamento dos passageiros, bem como a existência de cintos de segurança de 2 ou três pontos de fixação influencia, os resultados de ensaio. Na verdade a energia que a estrutura deverá absorver deverá ser diferente devido à diferente posição do centro de gravidade. O facto de existirem dois ou três pontos de apoio para os cintos influencia também essa energia que será absorvida pela estrutura em cada instante após o contacto com o chão. No caso de um autocarro urbano as especificações abordam mais aspectos construtivos e escolhas de materiais para os interiores como é o caso dos bancos mas as preocupações residem também com a possibilidade de projecção através de janelas.

## **Elementos Finitos**

O método de elementos finitos é uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos. Estes elementos são aproximados por funções diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos. A sua origem remonta ao século XVIII, mas a sua aplicação foi projectada como o aparecimento de computadores na década de 50, pois o poder de cálculo facilitou a resolução dos inúmeros sistemas de equações.

É largamente utilizada em todas as áreas, incluindo a mecânica dos fluidos, estruturas, medicina etc.

A determinação das propriedades físicas e químicas de cada elemento é importante, pois delas depende o comportamento do elemento em resposta á aplicação de esforços.

A visualização de resultados, tensões, deformações ou deslocamentos, é feita por uma escala de cores como é o caso do CosmosWorks ou o ABACUS. Pode ainda ser retirada sob a forma de tabelas para posterior tratamento de dados como é o caso do StressLab.

Algumas das principais vantagens são:

- As propriedades dos elementos não precisam ser necessariamente as mesmas que os elementos adjacentes, o que possibilita a utilização de corpos compostos por diversos materiais;
- Fronteiras irregulares podem ser aproximadas por usando elementos com lados estreitos ou representadas com exactidão utilizando elementos com fronteiras curvas;
- O tamanho do elemento pode ser variado. Esta propriedade permite que os elementos tenham tamanhos adaptados ao gradiente da função objectivo.

Desvantagens:

- A necessidade de computadores capazes de tratar grandes quantidades de informação; no entanto esta é uma questão quase ultrapassada devido à evolução constante dos computadores

Apresentam-se seguidamente algumas observações, retiradas das referências [3-7], que abordam exemplos de aplicação de métodos de elementos finitos em veículos.

## Um ataque terrorista

Um estudo que me merece destaque, a modelação de um ensaio da explosão de uma bomba sobre um mini-autocarro, simulando um ataque terrorista, [3]. O modelo é inserido num ambiente com uma malha de ar, chão e carga explosiva (Euler mesh) utilizando o software LS-DYNA. Podemos ver assim um exemplo de aplicação dos métodos de elementos finitos a uma situação envolvendo variados materiais incluindo o ar, onde se propagam ondas de choque.

A colocação da carga explosiva é colocada junto da roda da frente.

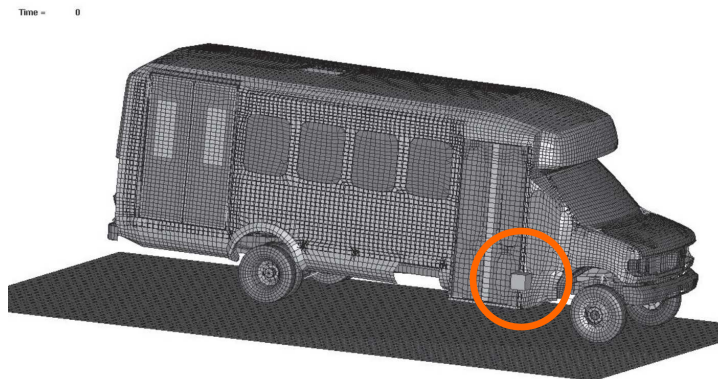


Figura 6 – Pequeno autocarro sujeito a um teste de carga explosiva, posicionamento da carga.

Após 30ms são registados os danos sobre a estrutura modelada em elementos tipo “shell” para os elementos compósitos de revestimento e elementos “solid” e alguns elementos tipo “beam”.

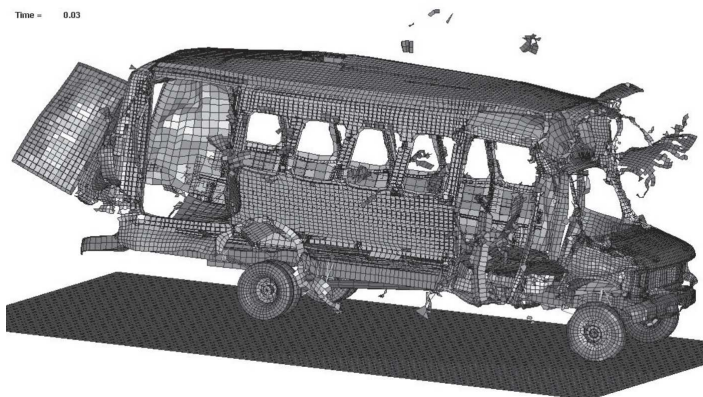


Figura 7 – Danos Provocados por uma carga explosiva após 0,03 segundos.

A determinação da velocidade de choque no interior é muito importante, podendo ser responsável por danos nefastos em tecidos humanos.

Na tabela seguinte registam-se os valores de aceleração a partir dos quais danos no corpo humano.

### Mine Blast Acceleration Injury Assessment

Part	Shock/Acceleration	Injury
Head	a=150g for 2 ms	High risk of brain damage
Pelvis	a=40g for 7ms	High risk of spinal cord damage
Feet	v=3.5 to 5.0 m/s	Apparition of lower leg fracture

Source: Alem 1996.

**Tabela 1 – Danos provocados pela aceleração devido ao rebentamento de uma mina explosiva.**

Uma outra relação muito importante referida é a curta duração e variação das ondas de impacto, determinadas sobre porcos (devido a constituição similar com os humanos).

### Overpressure and Blast Injuries

Injury	Overpressure Values* [kPa]	
	Rabbits	Pigs
Barotrauma	56	56
Mild contusion	134	130
Moderate injury	217	237
Heavy injury	280	371
Lethal injury	490	1074

\*Turin, unpublished materials.

**Tabela 2 – Danos provocados em coelhos e porcos devido ao aumento de pressão.**

Embora a modelação de ondas de choque no ar, e a interacção entre as onda de choque e a estrutura não tenha sido validado até então mostrou-se o interesse em aplicar elementos finitos a diversos campos que não só o do desenvolvimento de novos produtos.

## Modelação de um comboio articulado

Este estudo é também interessante e demonstra mais uma vez a aplicabilidade dos elementos finitos a meios de transporte, [4]. Neste caso, os elementos finitos são aplicados a um problema envolvendo a componente elástica do comportamento dos materiais e um número elevado de restrições e devido a deformação no regime elástico. O objectivo foi determinar as frequências de vibração para assegurar os níveis de conforto segundo a norma ERRI-B1532.

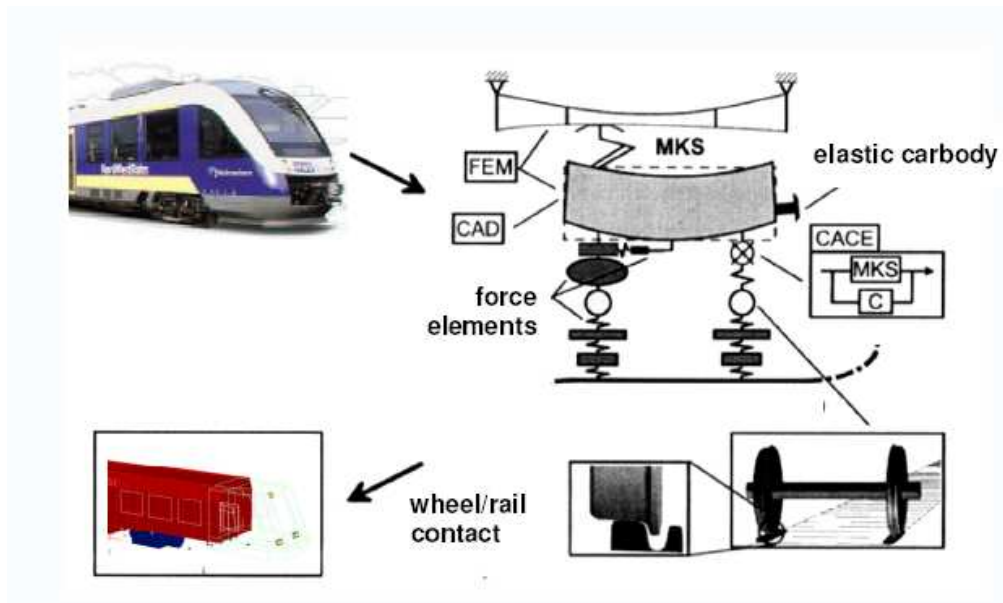


Figura 8 – Modelação do sistema de suspensão de um comboio.

A modelação é feita em Ansys enquanto a integração é feita em Simpack. O Ansys é utilizado na criação dos nós enquanto a integração da formulação de elementos finitos e a representação gráfica do movimento dos nós é feito em Simpack.

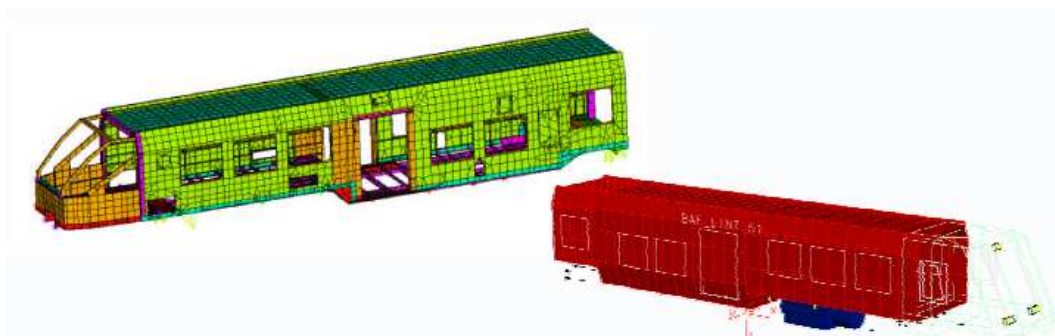


Figura 9 – Modelação do comboio por elementos finitos.

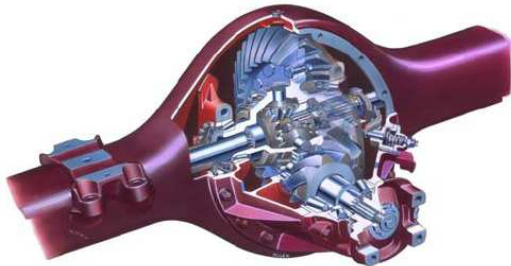


## Estudo do diferencial de uma camião por MEF

A SCANIA é um construtor de camiões e autocarros bem como de motores para a indústria marítima. Os camiões de movimentação de cargas pesadas estão sempre sujeitos a grandes esforços aumentando a probabilidade de ocorrência de fadiga.

Um motor diesel transmite potência a um diferencial através de uma caixa de velocidades e de um eixo de torção. Geralmente estes componentes estão sujeitos a grandes esforços durante o seu trabalho e por esta razão são elementos críticos, objecto da atenção da engenharia.

O binário e forças de flexão e torção são transmitidas ao diferencial e portanto as suas partes constituintes, rodas dentadas, eixos, rolamentos entre outros, podendo ocorrer efeitos indesejáveis tais mau engrenamento, ruído ou mesmo fuga de óleo nas juntas.



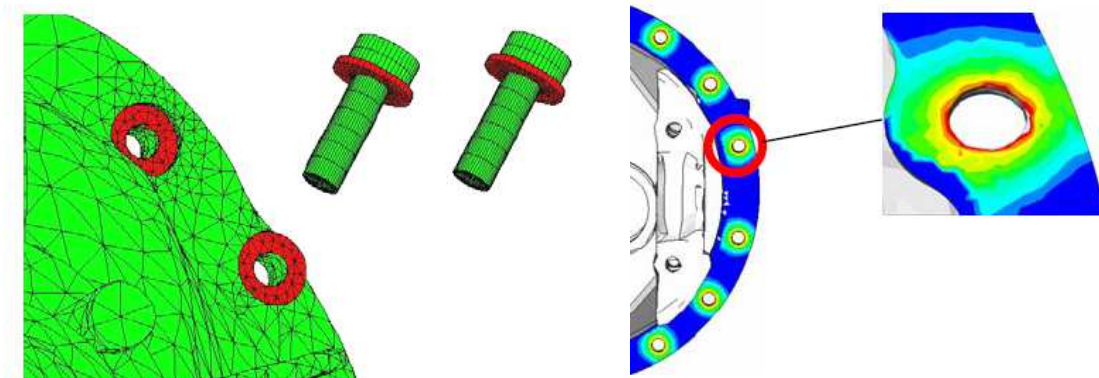
**Figura 11 - Diferencial comum a Camião e Autocarro**

Perdas de óleo conduzem à gripagem dos elementos por aquecimento e desgaste excessivo. O estudo quer de juntas quer da estrutura do diferencial ou outros pontos de possível fuga de óleo, são obrigatoriamente minuciosas.

As fugas dão-se geralmente na ligação aparafusada de união dos corpos

exteriores do diferencial, e são originadas por esforços resultantes, por exemplo de uma travagem com o veículo carregado. O estudo [5] foi efectuado em Catia V4 (modelação) e em ABAQUS (elementos finitos). As cargas estáticas tentaram simular esforços de carga na posição das rodas ou na entrada do eixo de torção.

ligação aparafusada de união dos corpos



**Figura 12 – Pormenor da zona de aperto das duas partes do diferencial.**

Do estudo resultaram algumas soluções tais como reduzir espessuras em determinados pontos ou aumentar o número de parafusos noutras zonas.



O modelo numérico foi validado recorrendo a um teste físico baseado no deslocamento de um ponto.

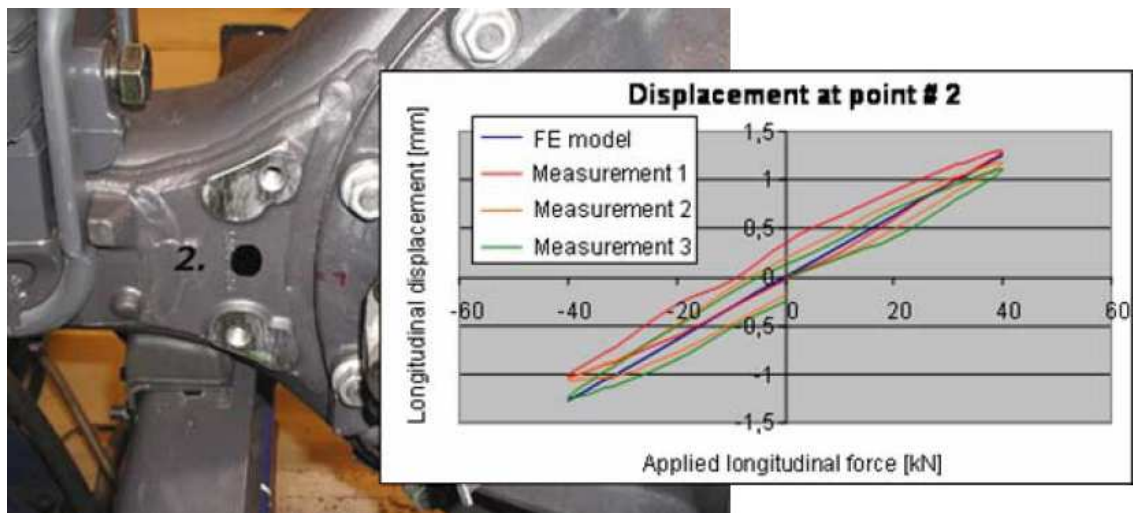


Figura 13 – Validação do modelo através do cálculo experimental do deslocamento num ponto.

### *Elementos Finitos Aplicado a Autocarros*

A garantia de uma zona de segurança no caso de um capotamento, é uma das imposições do Regulamento Europeu ECE R66 para a segurança dos ocupantes e para o condutor de um autocarro. Este espaço tem que garantir 500mm acima do chão (nível dos pés) do autocarro, 300mm da lateral do veículo (pilar dos vidros). Por esta razão a deformação da estrutura tem que passar o teste rollover tendo como propósito salvar vidas. A certificação de um autocarro pode ser obtida por um teste real com um autocarro de teste segundo normas especificadas, ou então por simulação numérica. O estudo da deformação dos pilares e da estrutura torna-se extremamente importante para a segurança, motivando a utilização do método de elementos finitos, que também se justifica por economia de custos.



Figura 14 – Capotamento de autocarro devido a acidente

Devido ao seu percurso qualquer autocarro está sujeito não só a capotamentos mas também a acidentes de viação tais como impactos laterais. Existem por isso também estudos abordando a questão da integridade estrutural no caso de impactos mais violentos.

## Teste de capotamento utilizando o LS-DYNA

A TEMSA A.S é um importante fabricante de carroçarias para autocarros oferecendo ao mercado as aptidões e qualificações dos seus quadros laborais bem como baixos custos de produção. Devido à globalização vê a necessidade de se expandir com o objectivo de desenvolver e inovar os seus produtos. Colabora com produtores mundiais de componentes e baseia-se na consultadoria europeia.

Com o objectivo de alcançar a satisfação dos clientes com produtos de qualidade o melhoramento, a inovação e desenvolvimento são um dos principais objectivos.

A TEMSA baseia o seu estudo em ferramentas CAE, tais como o Ansys e cooperando com a CADFEM GmbH and TÜV Süddeutschland. A análise dinâmica não linear é efectuada no software ANSA (crash FEA pre-processor).

O estudo de elementos finitos em LS-DYNA, [6], assentou numa validação experimental em laboratório do autocarro pela CADFEM GmbH sob as mesmas condições, obtendo-se uma boa correlação entre a simulação e o ensaio real o modelo.

O modelo é composto por elementos tipo shell, beam e mass.

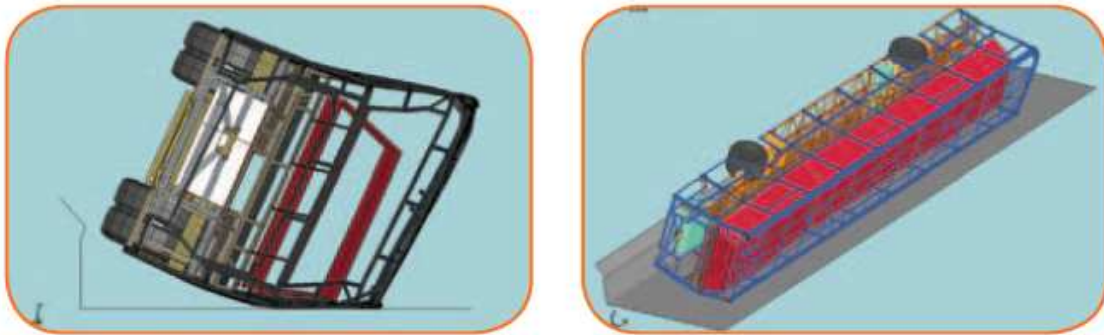


Figura 15 – Teste de capotamento simulado por via numérica, área de segurança.

Um dos cuidados que se nota é a correcta modelação. Por exemplo, elementos rígidos representam o motor, caixa de velocidades e tanque de combustível, sendo a sua massa e inércia calculadas e impostas no nó mais próximo do seu centro de massa.

## Estudo do impacto lateral num autocarro usando o ANSYS/LS-DYNA

A CAPOCO Design Ltd tem estado na vanguarda do design e engenharia de autocarros há cerca de 25 anos. Actualmente o seu dono, Alan Ponsford, é parceiro na fundação Newbus Technology Ltd, um consórcio virado para a tecnologia do futuro tal como o desenvolvimento de uma unidade eléctrica bem como uma célula de combustível.

### Propósito do Projecto:

O objectivo deste projecto, [7], foi o de simular o impacto lateral de um carro num autocarro, a fim de avaliar a quantidade de energia absorvida pelo autocarro, bem como os danos causados, como, por exemplo, a deformação da estrutura. Um acidente deste tipo pode afectar a segurança dos ocupantes. Para isso foram utilizados os softwares ANSYS / LS-DYNA.

O autocarro é construído em aço excepto o tejadilho em alumínio.

O modelo é constituído por cerca de 28,700 elementos e 16,300 nós, com 12 graus de liberdade por cada nó. O automóvel é substituído pelo pára-choques (a verde na figura 16) modelado como “Shell - 4 noded”.

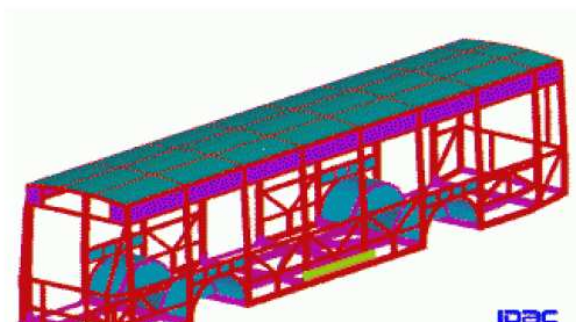


Figura 16 – Autocarro modelado em elementos de viga e casca utilizando o software Ansys.

Foi imposto a velocidade de 3.14m/s ao pára-choques, aumentando a sua energia para 9kJ.

Duas conclusões retiradas do estudo resultam da monitorização da estrutura como mostram os gráficos seguintes, a velocidade do pára-choques diminui com o tempo e a energia cinética absorvida pela estrutura varia com o tempo.

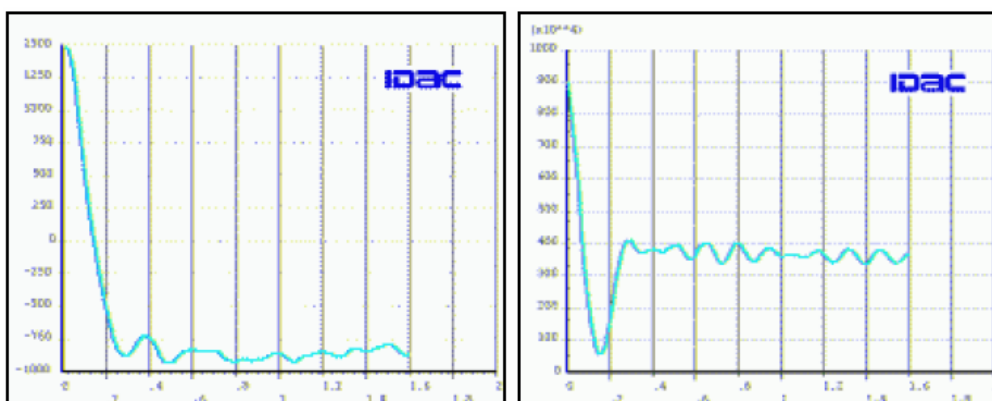
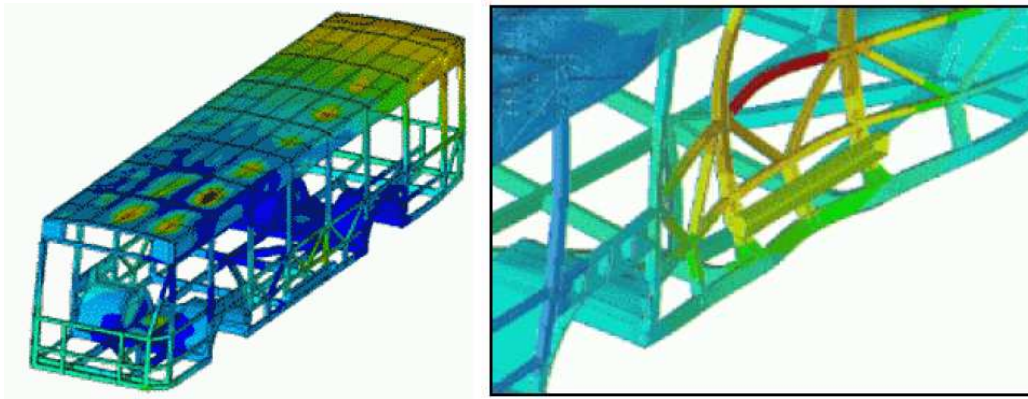


Gráfico 1 – Variação da velocidade do pára-choques (à esquerda) e da energia absorvida com tempo (à direita).

As figuras seguintes mostram o modelo em teste e também a zona pós impacto.



**Figura 17 – Resultados de um ensaio lateral**

Deste estudo resultam benefícios óbvios para a empresa CAPOCO, não só no que diz respeito à capacidade de modelação em elementos finitos mas também a software e hardware.

### **3 - Caso de estudo.**

As solicitações a que um autocarro pode estar sujeito são variadas, incluindo eventuais podemos referir, embates contra objectos parados ou em movimento, sobrecargas de passageiros, travagens bruscas com ou sem mudanças de direcção, variação brusca de direcção resultando esforços devido a acelerações em diferentes direcções, esforços resultantes da subida de um passeio em que no limite uma roda fica suspensa e efeito da variação temperatura entre componentes, por exemplo.

A situação que nos permite calcular esforços em regime estático é a condição em três apoios pois é de todos o pior caso que se conhece. No caso limite refere-se ao autocarro ficar apoiado apenas em três rodas, devido à subida de um passeio por exemplo. No caso de subida do passeio a suspensão pneumática actua de forma a atingir equilíbrio nunca ficando completamente nivelado. O tema da suspensão foi já referido por outros estudos, Anexos 1, e comportando-se de forma rígida como consequência de um a velocidade de solicitação nula.

O modelo a ser estudado por elementos finitos é um autocarro do tipo urbano destinado a circuitos citadinos, em que a maioria das pessoas viaja de pé e sem bagagem. Possui 29 lugares sentados e 72 de pé, 12 metros de comprimento e um peso bruto de 17813kg, sendo que duas grandes contribuições de peso são a do chassis e das pessoas.

De forma a evitar erros de interpretação, o modelo em desenvolvimento será designado por Urbano, enquanto o modelo já existente modelado por A. Morais, [1], será designado por Carris.

## Software Utilizado

Nos tempos que decorrem os computadores são uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de produto mais rápido, auxiliando a engenharia em muitos campos distintos. A rápida evolução dos computadores permite a criação de algoritmos e softwares mais elaborados capazes de reproduzir melhores cálculos, resultados, mais capacidade de informação e melhor interacção com utilizador.

O desenvolvimento necessita de respostas rápidas a problemas de cálculo estrutural assente em ferramentas CAE e FEM, facilitando por isso a integração de novos softwares. O software actualmente utilizado pela CaetanoBus é o StressLab (Cadd5), ferramenta que apesar da sua evolução ter parado há alguns anos possui características importantes que seguidamente irei referir. Outra ferramenta utilizada no cálculo de elementos finitos é o Cosmos, ferramenta do SolidWorks.

Ambos os programas apresentam vantagens e desvantagens. Seguidamente falarei de algumas tendo o cuidado de não abordar extensamente estes dois programas, pois penso ultrapassar o âmbito deste estudo.

O StressLab, tal como o Cosmos, é uma ferramenta inserida num programa tipo CAE ou CAD.

A grande vantagem do StressLab a utilizar no cálculo deste tipo de estrutura tão complexa como é um autocarro, é a rápida execução de cálculo considerando elementos “beam” de dois ou três nós e “shell” de três ou quatro nós, mas também “solid” entre outros. É uma forma de modelar um autocarro com toda a sua estrutura resistente e componentes mais importantes. Uma vantagem clara é a linha de comandos permitindo introduzir comandos com uma linguagem facilmente perceptível (escrita inteligente) tal como “Insert Line”. Só é preciso introduzir parte da palavra e ele completa ao introduzir espaço ou emite um sinal sonoro a uma tentativa de introduzir um comando que não reconhece. Permite por isso rever muitos dos comandos introduzidos durante uma sessão de trabalho facilitando uma análise do que foi feito. Outra característica importante quando há presença de erros é indicar-nos qual o elemento de viga ou casca causador desse erro. Após alguns dias de trabalho é fácil conhecer os erros tipo, neste tipo de modelação. Nós sobrepostos e elementos de comprimento zero são erros tipo que são facilmente detectados. A produção de elementos acaba por ser fácil, introduzindo os nós em extremos de linhas previamente desenhadas ou pela simples introdução das coordenadas cartesianas por exemplo. Permite a criação de grupos revelando-se uma característica importante bem como a utilização de várias cores para os elementos ou nós, facilita o agrupamento de perfis pertencentes ao estrado ou ao tejadilho por exemplo, com cores diferentes de modo a permiti identificar elementos diferentes por exemplo.

Apresenta no entanto alguns pontos negativos devido à estagnação do seu processo evolutivo. O início da sua aprendizagem pode ser desencorajador. Muitas

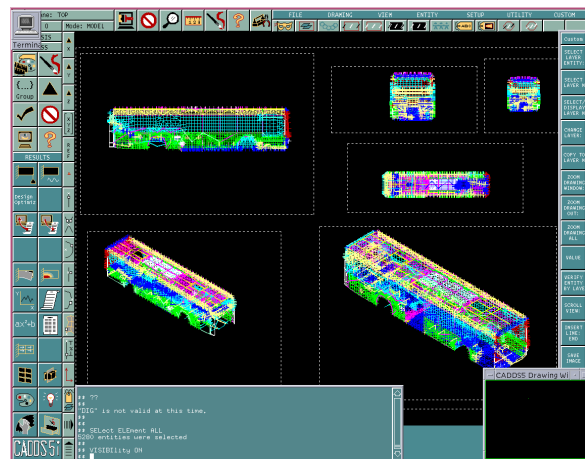


Figura 18 – Ambiente de trabalho do CADD5



vezes o sinal sonoro de erro de comando, ainda que importante, torna-se irritante, mas passado pouco tempo é “fácil de utilizar” e apita menos vezes. A sua “área de trabalho” é baseada em planos pré definidos, 6 tal como as faces de um cubo e ainda uma vista isométrica construindo um modelo 3D. Não é difícil adicionar novos planos, basta definir duas linhas por exemplo. A questão complica-se quando se pretende manipular uma vista, onde rodar, aumentar e diminuir não são acções propriamente fáceis, rápidas ou de boa funcionalidade gráfica pois desajustam todo o enquadramento da área de trabalho. O comando “undo” não existe e quando um erro é cometido há que apagar e fazer de novo. Pior é quando o erro é de grande dimensão e refazer pode demorar imenso tempo, então a única solução é rezar para que tenha sido feita uma cópia antes do erro. A introdução de dados pode ser um processo lento já que não existem livrarias de materiais ou perfis, e a solução passa por copiar ou utilizar outro trabalho já existente.

Apesar destes pontos favoráveis e desfavoráveis, com o tempo acabamos por nos adaptar bem, ouvimos menos vezes o sinal sonoro, mas pena é que o tratamento de dados, cálculo do critério de resistência Von Mises ou Tresca, tenha que ser feito à mão recorrendo ou a Folhas de Excel. Depois de mecanizada a análise de dados torna-se mais rápida, mas demora sempre algum tempo. Por outro lado devido à sua rapidez de cálculo para este tipo de elementos permite testar muitas soluções em pouco tempo, permitindo tirar rápidas conclusões. Um cálculo demora no máximo 40-45 segundos, os resultados dos esforços (forças e momentos) nos nós, tensões normais e tensões de corte, deslocamentos nos nós entre outros são retirados em ficheiro de texto que depois são importados para Excel. A forma gráfica também está disponível podendo visualizar-se os mesmos dados, ou mesmo uma animação gráfica bastante elucidativa.

Penso que para além de ser uma ferramenta “desactualizada”, é sempre uma mais valia devido as suas características positivas.

Outra ferramenta utilizada em estudos académicos e em termos de estágio é o CosmosWorks, ferramenta FEM do conhecido SolidWorks.

Este software de análise de elementos finitos serve de apoio a pequenos estudos, pois para modelar um autocarro desta dimensão é preciso um computador já com algumas características interessantes. Para malhar, e correr os algoritmos de elementos finitos já seria preciso uma máquina de valor considerável e durante um intervalo de tempo, que certamente ultrapassaria uns largos minutos, senão horas ou mais do que isso.

Os SolidWorks têm imensas vantagens na modelação, sendo que o seu “help” é geralmente muito útil e simples de utilizar. É fácil desenhar em 2D e transformar em 3D, possui uma manipulação muito fácil da peça ou modelo, bastando utilizar o rato. A desvantagem deste programa é a existência de erros, que por vezes não se conseguem identificar. A única solução é fazer de novo, ou então perder tempo (às vezes muito) até resolver a questão.

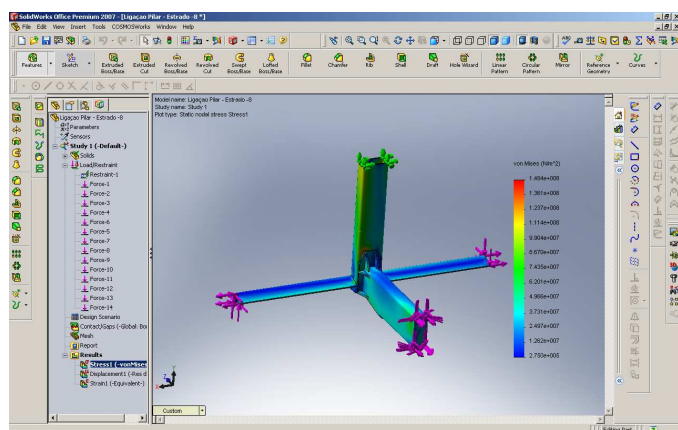


Figura 19 – Ambiente de trabalho do SolidWorks/Cosmos

O CosmosWorks é uma ferramenta de elementos finitos que permite análises estáticas, de fadiga, térmica ou mesmo optimização, com elementos sólidos e cascas por exemplo. Cria automaticamente a malha mas permite malhar zonas com malhas mais finas de forma manual. Seguidamente efectua o cálculo e mostra os resultados, tensões de Von Mises, deslocamentos, deformações de forma gráfica simples podendo mesmo tirar valores em pontos à escolha sob a forma de tabela.

O grande interesse deste software é analisar zonas do autocarro de forma a optimizar ligações ou estudar pormenores, cujos esforços sejam conhecidos. Mais à frente, será abordada uma ligação de perfis mas também um estudo de uma ligação colada de um vidro.



## Estudos Preliminares

### *Reparação – Pilares Fracturados*

Devido a alguns fenómenos conhecidos, a fractura de pilares pode acontecer bem como podem sofrer danificação algumas ligações dos painéis laterais da carroçaria ao tejadilho e ocorrer oxidação localizada entre a cola e os perfis onde são colados os vidros. Depois de um pilar estar quebrado, os esforços são distribuídos pelos pilares adjacentes originando uma ruptura acelerada nesses pilares.



**Figura 20 – Veículo em reparação**

A reparação dos pilares é efectuada com o reforço por dentro da estrutura dos pilares, isto é aumentando a espessura do perfil resistente. São criados furos no perfil exterior de forma a soldar o pilar de reforço (interior) ao pilar do autocarro. Seguidamente é dado um tratamento (Dinol) para proteger o perfil da corrosão. Durante a reparação o veículo é escorado para evitar ou eliminar empenos. Além de ser um processo moroso tem custo avultado pois exige uma grande mão-de-obra, além de ser incómodo para a empresa proprietária.



**Figura 21 – Reforço do Pilar da porta**

O processo de fractura pode ter várias origens, nomeadamente por fadiga ou defeitos de soldadura.

A fadiga ocorre fora dos limites do cálculo estático e acima do valor da tensão limite elástica tendo como uma das possíveis causas os percursos sinuosos de cidade. O excesso de passageiros poderá eventualmente ter também uma palavra a dizer no que diz respeito ao valor de tensões.

Uma das possíveis causas é a ferrugem provocando pontos de concentrações de tensões no fino perfil de 2mm para pilares, utilizado pela CaetanoBus como imposição do fabricante do chassis.

Outra possível causa serão os métodos de soldadura que em perfis mais finos possam criar tensões residuais de soldadura, que terão maiores influências em perfis mais finos.

Podemos ainda contar que o processo de fabrico dos perfis não garante perfis com 2mm de espessura em todo o seu comprimento, ou seja é possível que a fadiga tenha maior influência nas eventuais zonas de espessura ainda mais fina.

## ***Auxílio ao Projecto***

Este estudo teve como principal objectivo auxiliar as decisões de projecto para o novo autocarro designado por Urbano. Utilizou-se por base um autocarro urbano construído pela CaetanoBus destinado à Carris de Lisboa, designado por Carris. A modelação de vários modelos é extremamente importante, pois permite deixar um legado de informação para o futuro.

O estudo recaiu sobre duas estruturas existentes no autocarro, os pilares e o alongamento. Os pilares são estruturas muito importantes pois deles depende a ligação entre a parte inferior do autocarro e o tejadilho e garantem a zona de sobrevivência imposta pelo regulamento de segurança. A ligação entre os módulos do chassis é feita por intermédio do alongamento, alongamento que está ligado ao estrado na zona entre rodados do autocarro. Esta estrutura é de extrema importância, pois é ela que suporta os esforços transmitidos pelos pilares ao estrado na zona intermédia do autocarro.

Devido a existência do modelo Carris, não muito claro para mim, e com ausência de ar condicionado, foi ligeiramente alterado, bem como modificados os grupos de forma a acertar o modelo.

A não verificação do centro de gravidade dos módulos do chassis poderá eventualmente provocar um comportamento ligeiramente diferente da estrutura resistente.

## ***Pilares***

Os grupos de estudo recaíram nos seguintes para os pilares:

- Carris (trabalho de A. Morais, [2]) – 100x40x4 nos pilares das portas e 60x40x4 nos restantes
- Ensaio 1 – 60x40x4 nos pilares das portas e 60x40x4 nos restantes.
- Ensaio 2 – 80x40x4 nos pilares das portas e 80x40x3 nos restantes.
- Ensaio 3 – 100x40x4 nos pilares das portas e 80x40x3 nos restantes.
- Ensaio 4 – 80x40x3 nos pilares das portas e 80x40x3 nos restantes
- Ensaio 5 – 120x50x3 nos pilares das portas e 120x50x2 até uma cota de 1220mm da base do autocarro e 120x50x3 até ao tejadilho nos restantes pilares.

Os pilares objecto de estudo estão na seguinte imagem coloridos de branco, sendo que os das portas (lado direito) são geralmente mais resistentes e rígidos que os restantes, já que acomodam as portas e seus mecanismos mas também porque nessa

zona existe menos travamento fazendo com que sejam perfis mais longos, logo mais deformáveis.

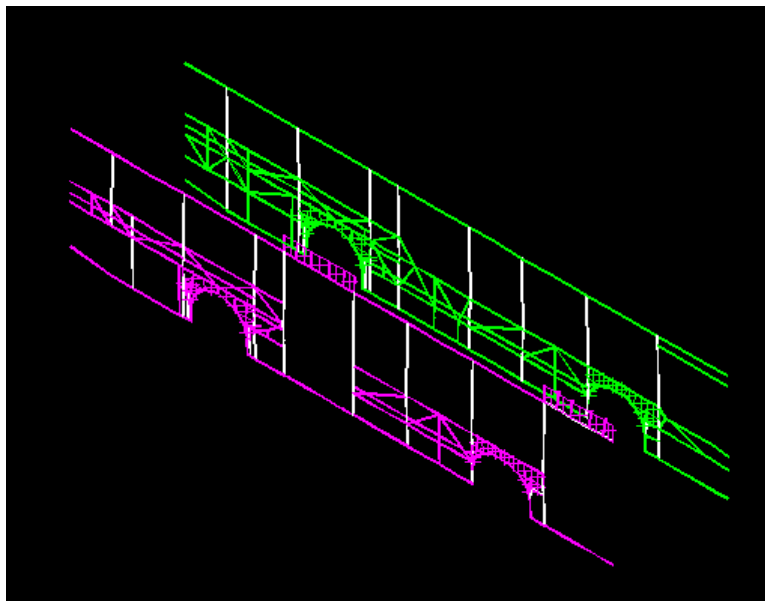


Figura 22 – Painéis laterais do modelo da Carris

### ***Alongamento***

Quanto ao alongamento, o fabricante do chassis fornece uma possível estrutura baseada em perfis tubulares 100x100x4mm, sendo que no modelo existente da Carris são 100x40x3mm. A análise recaiu sobre os elementos do estrado por fim a verificar o nível de tensões no estrado.

Na figura seguinte temos o alongamento entre os módulos do Chassis, sendo que as diagonais são geralmente perfis menos resistentes geralmente 50x50x3mm.

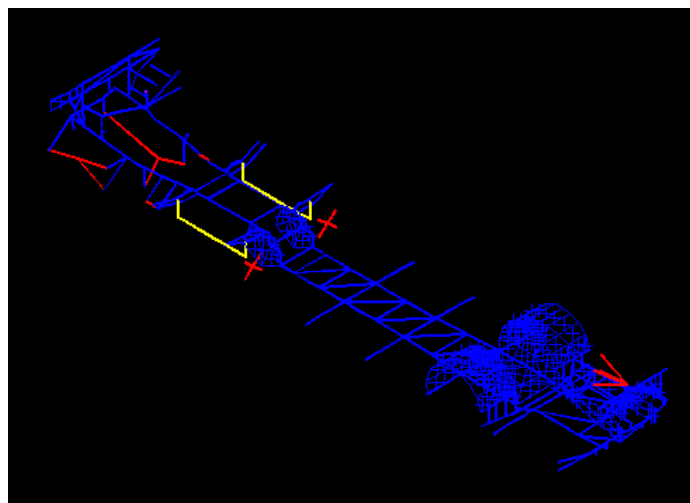


Figura 23 – Chassis e alongamento do modelo da Carris

## Resultados

Depois de tratados em Excel os resultados estão na tabela seguinte:

Tensão – Von Mises (MPa)					
			Máximos		
Pilares			Estrado	Autocarro	
Carris	Portas	100x40x4	<b>175,59</b>	<b>149,18</b>	<b>225,79</b>
	Outros	60x40x4	<b>183,36</b>		
Ensaio 1	Portas	60x40x4	<b>184,78</b>	<b>155,75</b>	<b>225,13</b>
	Outros	60x40x4	<b>148,32</b>		
Ensaio 2	Portas	80x40x4	<b>175,40</b>	<b>151,50</b>	<b>221,95</b>
	Outros	80x40x3	<b>168,04</b>		
<b>Ensaio 3</b>	Portas	100x40x4	<b>165,25</b>	<b>148,84</b>	<b>222,00</b>
	Outros	80x40x3	<b>168,11</b>		
Ensaio 4	Portas	80x40x3	<b>193,30</b>	<b>152,84</b>	<b>221,92</b>
	Outros	80x40x3	<b>168,20</b>		
Ensaio 5	Portas	120x50x3	<b>150,11</b>	<b>143,97</b>	<b>214,02</b>
	Outros	120x50x3	<b>136,70</b>		

**Tabela 3 – Comparação dos resultados do estudo**

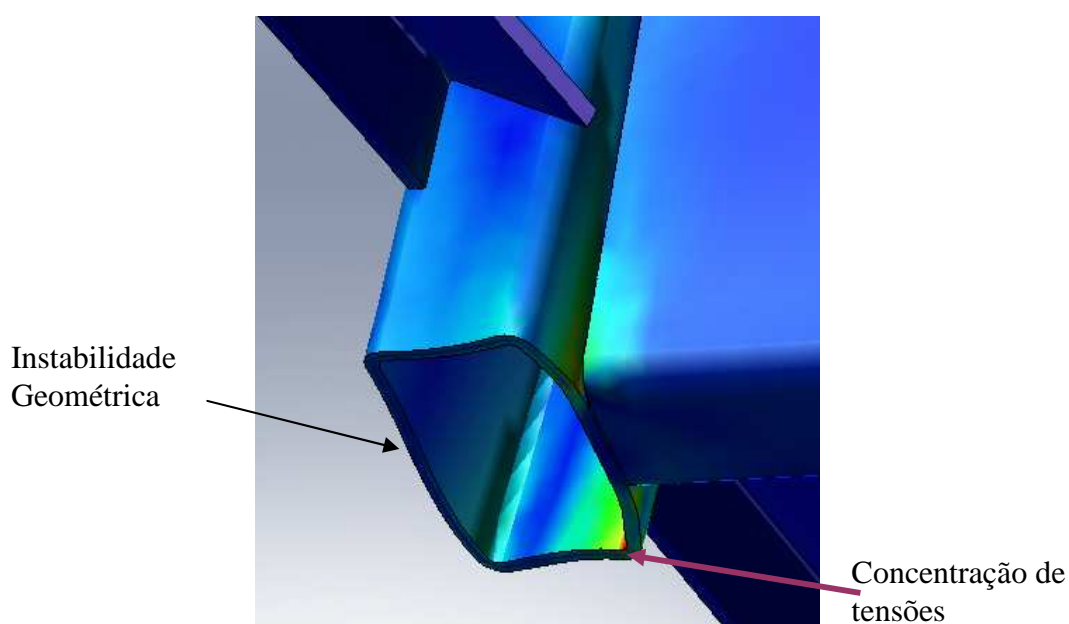
O modelo que apresenta melhores resultados é o modelo com perfis idênticos ao Ensaio 5, no entanto esta hipótese é completamente descartada pelos resultados práticos que pudemos confirmar anteriormente. Perfis mais finos estão mais sujeitos a fenómenos de fadiga, como vimos anteriormente. Sabe-se que a superlotação existe e associada a percursos sinuosos aumentam a também possibilidade de fadiga. Atinge-se mais facilmente o valor da tensão limite de fadiga quer devido ao aumento das tensões quer pelo do número de ciclos. O fenómeno é de difícil análise devido à complexidade da estrutura. Assim a escolha recai sobre a segurança e a melhor escolha de perfis é a do Ensaio 3, sendo a que possui as tensões uniformes mais baixas.

A escolha recai sobre o conjunto do Ensaio 3 que apresenta os valores mais baixos quer nos pilares quer no estrado, embora a “grande diferença” se note mais nos pilares das portas pois são os perfis mais compridos, logo teoricamente e geralmente os mais solicitados. Note-se ainda que variando a altura do perfil o valor máximo da tensão na estrutura (Autocarro) seja muito similar, mas aumentando a largura de 40mm para 50mm a tensão máxima baixou entre 6 e 9 MPa. A espessura do perfil tem em conta aspectos construtivos mas poderá ser ponderado como aumentar a secção resistente e a rigidez.

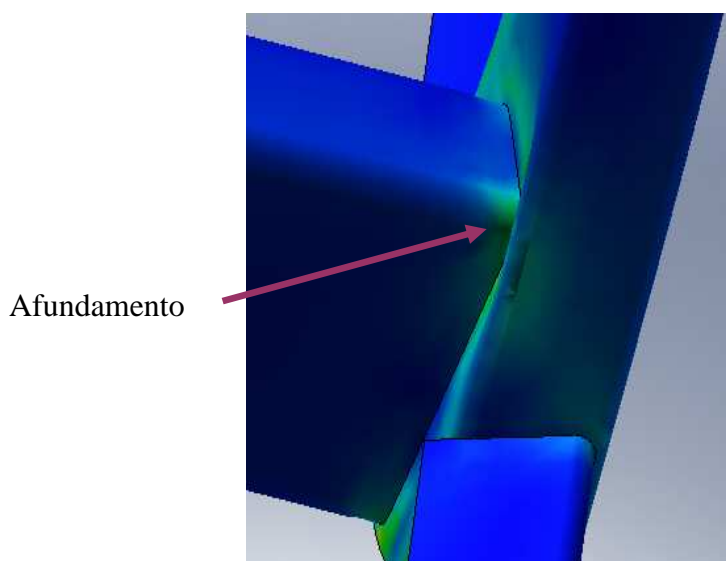
### ***Estudo da Ligação de um Pilar ao Estrado***

As ligações entre diferentes perfis de secções muito distintas em geral apresentam problemas de transmissão de esforços. A ligação deverá ser estudada tendo em conta as diferentes secções. Não deverá ser demasiado rígida e deverá ser resistente o suficiente. Rigidez excessiva poderá causar problemas nas zonas adjacentes, como afundamentos no perfil.

O reforço da ligação é importante para evitar instabilidade geométrica ou afundamento, como representadas nas Figuras 24 e 25.

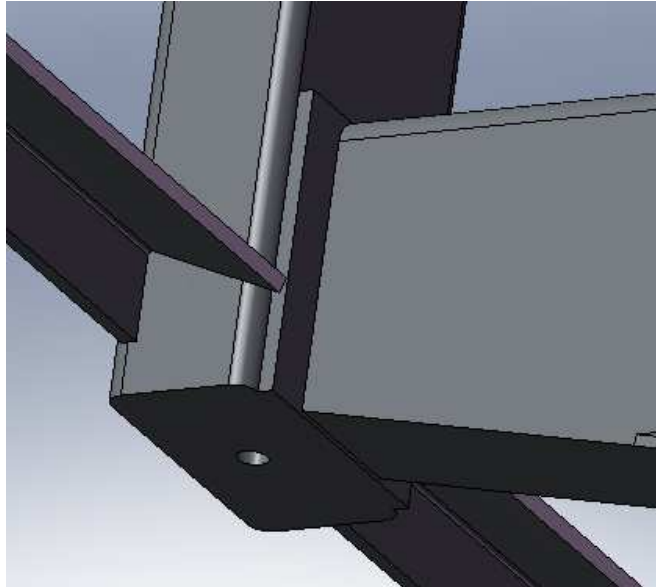


**Figura 24 – Ligação Pilar-Estrado**



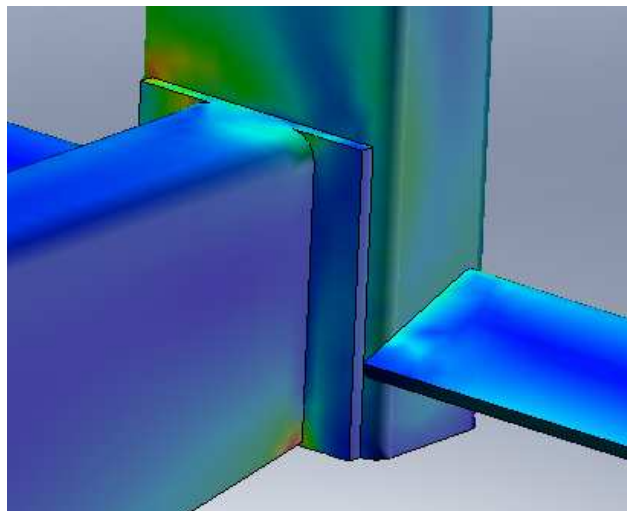
**Figura 25 – Vista da ligação Pilar-Estrado**

A utilização de chapas de reforço, que tenham no mínimo o mesmo módulo de resistência que o perfil, permitem corrigir alguns desses problemas. No caso do pilar a chapa de reforço poderá ter um “furo de respiro” para permitir a purga de humidade.



**Figura 26 – Ligação reforçada com uma chapa**

A tensão máxima calculada em SolidWorks é de 208MPa sendo o nominal de 80MPa calculado em StressLab resultando um factor de concentração de tensões de 2,6.



**Figura 27 – Tensões resultantes das forças aplicadas**

Após alguns estudos a solução encontrada que melhor minimiza a tensão máxima encontrada pelo SolidWorks foi a seguinte:

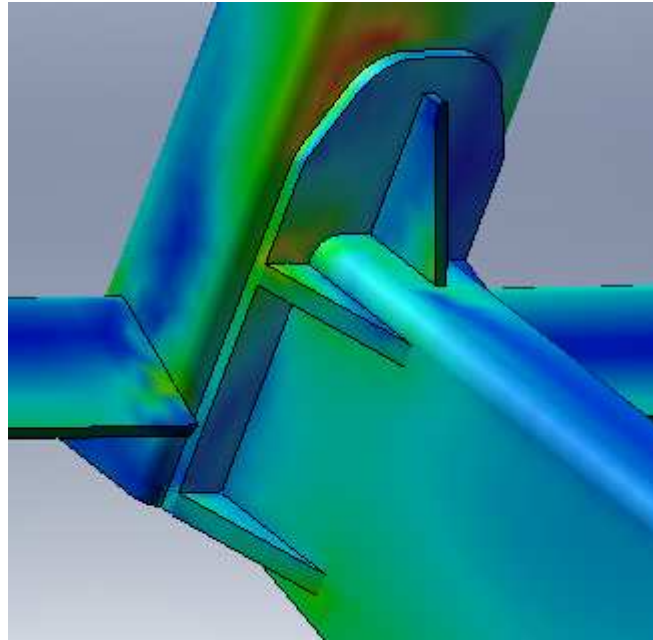


Figura 58 – Exemplo dos resultados de tensões quando aplicada uma chapa de reforço, com gousset.

No caso o factor de concentração de tensões passa para 1,6 onde a tensão máxima é de 129,4 MPa. No entanto esta solução poderá ser a melhor para este caso, optou-se por um reforço mais equilibrado utilizando dois *goussets* na zona superior, obtendo assim um factor de concentração de tensões de 1,85.

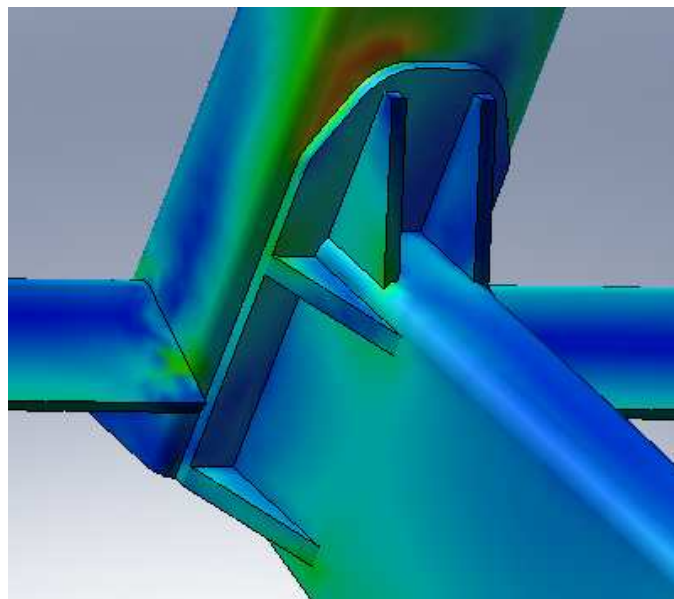


Figura 29 – Resultados de ligação melhorada



Na verdade as condições de encastramento não existem pois a ligação faz parte de um conjunto complexo de perfis, chapas e colas por exemplo. Com o objectivo de diminuir o aumento de rigidez provocado pelo encastramento o perfil sofreu um alongamento da cota real.

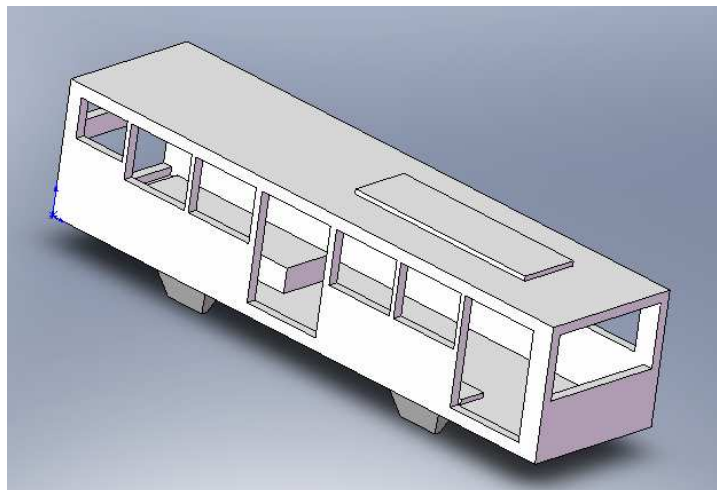
Os reforços não deverão ser muito grossos para não tornar a ligação demasiado rígida, nem muito finos para não estarem sujeitos a fenómenos de instabilidade geométrica. No caso dos superiores os extremos deverão ser cortados para evitar pontos de concentrações de tensões e facilitar o processo de construção como por exemplo a soldadura.

### ***Distribuição de Massas.***

A correcta distribuição de massas é extremamente importante. As forças provocadas por essas massas provocam momentos flectores associados a esforços de tracção ou compressão, resultando tensões normais e momentos torsores que originam tensões de corte provocando deslocamentos. Caso se exceda o limite elástico será provocada deformação permanente. Podem ainda provocar fenómenos de fadiga originando fracturas e um possível posterior colapso da estrutura.

O caso seguinte é puramente académico e pretende demonstrar que os níveis de tensões e deformações são influenciados pelas posições de cargas (massas) em colocadas em diferentes pontos, sejam elas componentes como o ar condicionado, portas depósito de combustível ou qualquer outro com massa significativa.

Parecendo um autocarro é uma estrutura simplesmente modelada em SolidWorks cujo material é ABS, com uma força de 10N aplicada em várias áreas.



**Figura 30 – Modelo em PVC**

Pudemos verificar nos três casos considerados que as tensões de Von Mises são diferentes, dependendo como é lógico da sua intensidade, mesma força mas áreas



diferentes, mas pretende-se provar que uma força, simulando uma massa, provoca tensões diferentes e comportamentos diferentes dependendo da sua posição.

No primeiro caso a força é colocada na traseira provocando uma tensão máxima de 8,3MPa. No segundo caso a força está no “tejadilho”, a tensão provocada é diferente baixando para os 4,3MPa sendo que quando a carga é colocada na frente a tensão máxima ultrapassa os 8,5MPa. Verifica-se que o comportamento da estrutura é diferente de caso para caso. Por esta razão é importante modelar todos os elementos o mais correctamente possível. O chassis pode ser de mais difícil modelação já que a informação necessária pode não se encontrar disponível, como foi o caso.

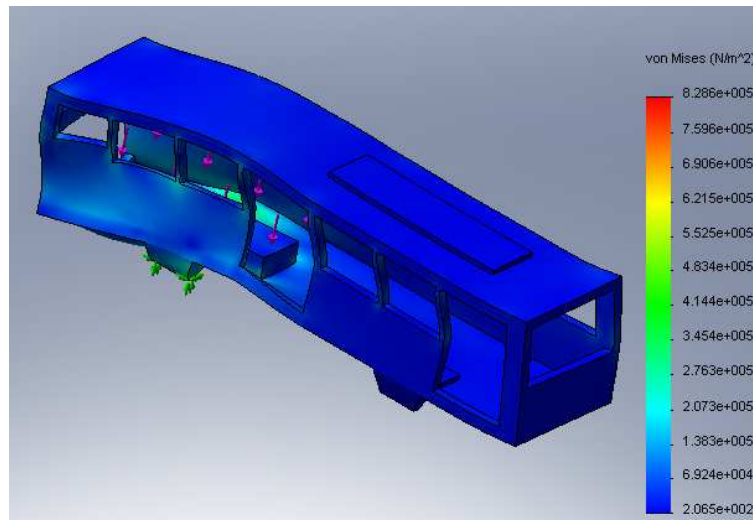


Figura 31 – Resultados da aplicação de uma força na traseira (interior) do modelo

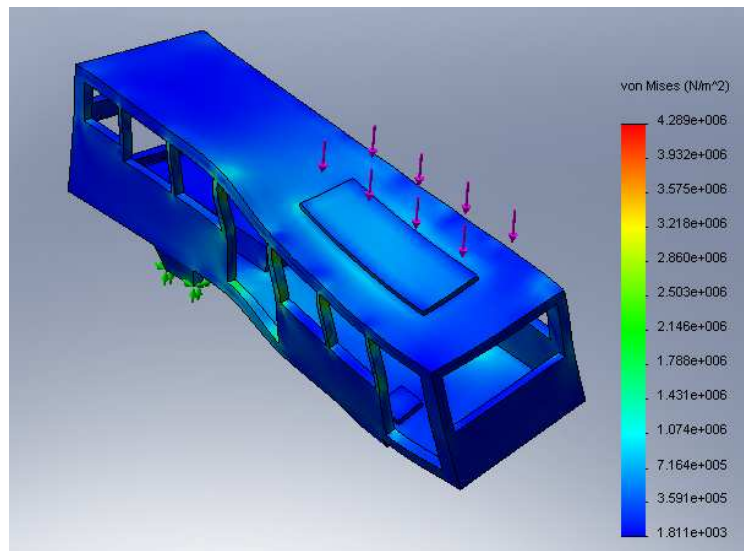


Figura 32 – Resultados da aplicação de uma força na parte superior do modelo

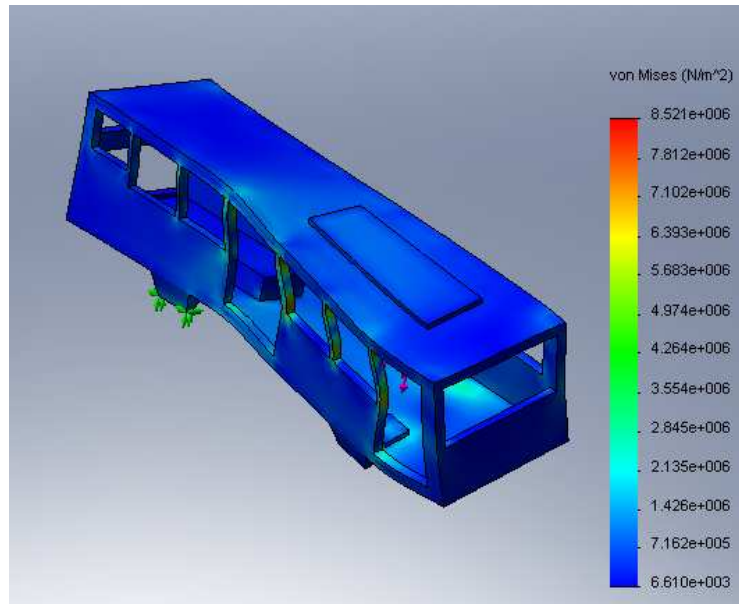


Figura 33 – Resultados da aplicação de uma força na frente (interior) do modelo

### ***Módulo de Young Cola – Vidro***

O binómio cola vidro influencia o comportamento da estrutura, e por isso merece uma especial atenção na análise da estrutura.

O conjunto tem um comportamento que dependerá das dimensões de cada um. Na verdade para o cálculo do Módulo de Young torna-se facilitado pelo recurso ao SolidWorks calculando os deslocamentos, facilitando a utilização da conhecida expressão:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Conhecidas as dimensões de secção da cola (21x6mm) e do vidro (1000x1000mm) com uma espessura variável regista-se o cálculo do Módulo de Young bem como os deslocamentos para cada caso de aplicação de força na direcção da força. A cola é considerada como um encastramento, sendo a força aplicada na área de secção transversal de meio vidro. Esta escolha baseia-se na condição de o vidro funcionar praticamente à tracção, com o afastamento a aumentar entre os pilares que o suportam, condição que sucede neste tipo de ensaio.

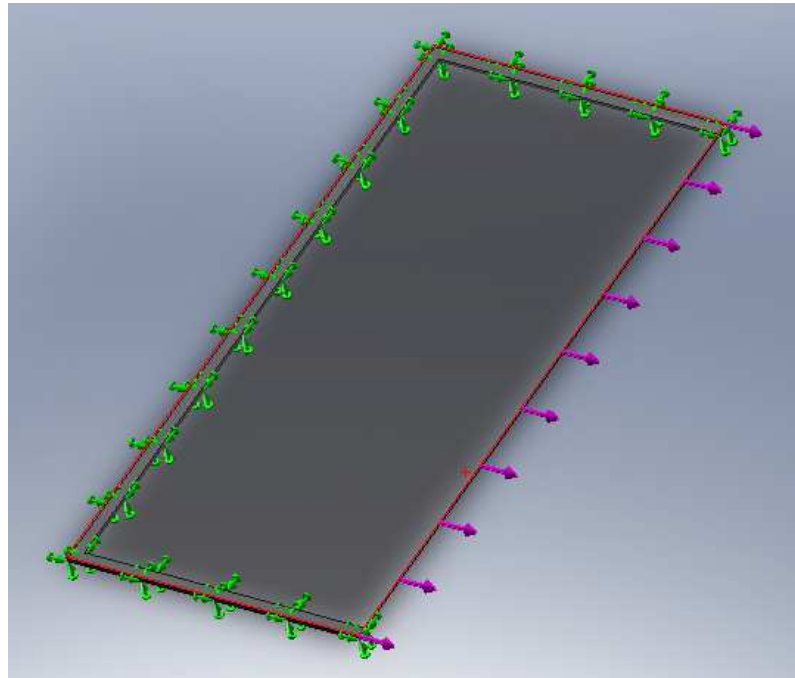


Figura 64 – Vidro modelado, com condições fronteira e carga aplicadas

Considerando uma carga de 100N, 1000N e 2500N o comportamento é linear e independente da carga, como podemos verificar no gráfico.

As características da cola e do vidro utilizadas estão na base de dados do SolidWorks, considerando o Módulo de Young para a cola de 6MPa e para o vidro de 68GPa e são utilizadas apenas para o estudo.

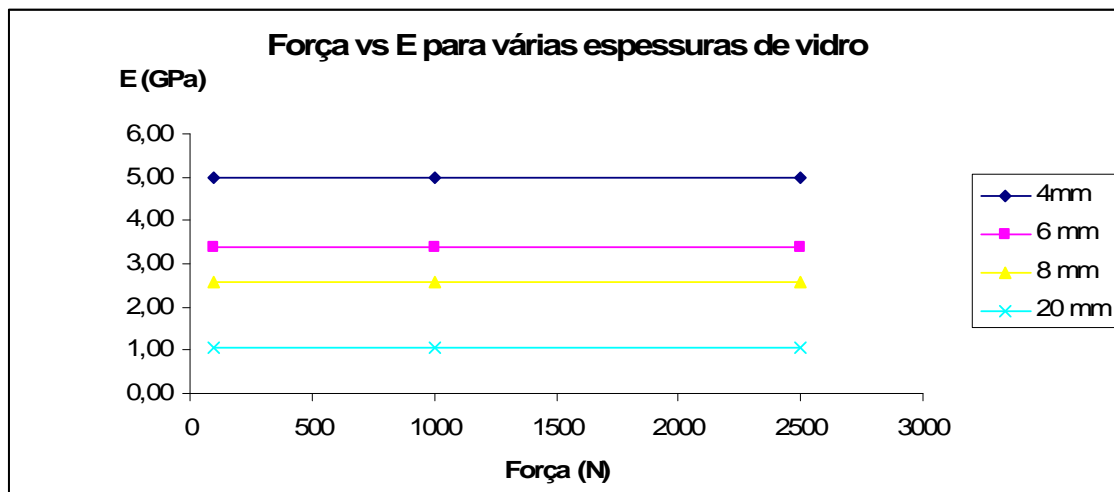


Gráfico 1 – Variação do módulo de Young com a espessura do vidro

Na verdade se atendermos às 4 espessuras consideradas verificamos que o comportamento do Módulo de Young tem um comportamento não linear em função da espessura e à medida que a espessura do vidro aumenta o valor do Módulo de Young decresce, tendendo para o valor do Módulo do elastómero, isto é, o vidro torna-se numa

estrutura mais rígida, tendo o elastómero que suportar o deslocamento imposto pela carga.

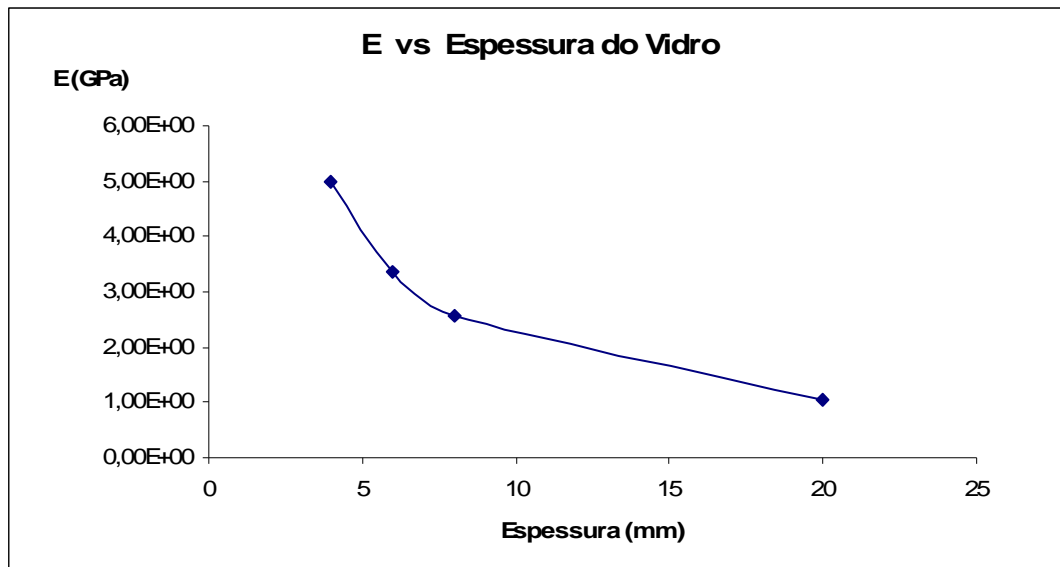


Gráfico 2 – Variação do Módulo de Young com a espessura do vidro

No gráfico seguinte podemos ver a relação entre os deslocamentos entre a força e o deslocamento, em cuja relação assenta o cálculo de elementos finitos.

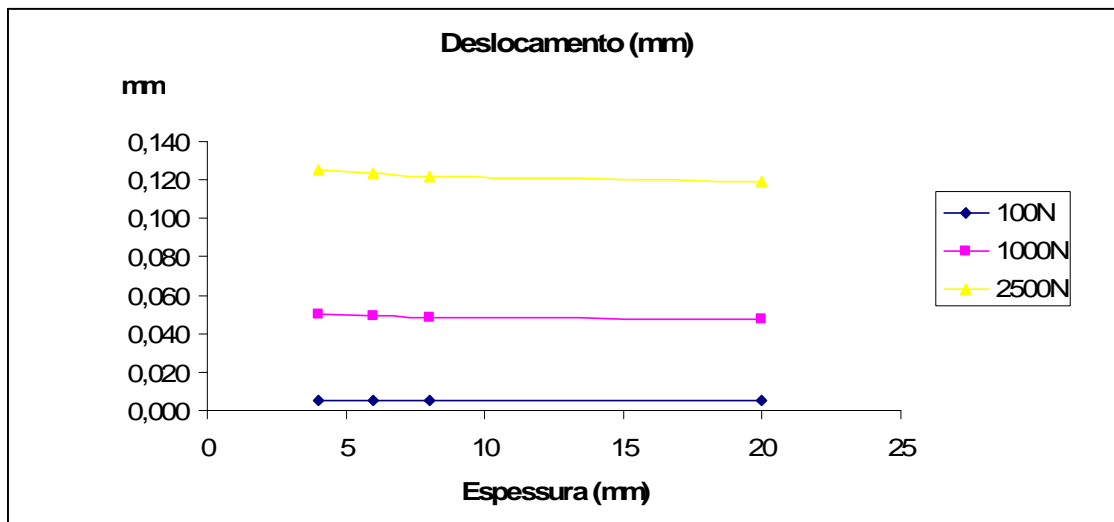


Gráfico 3 – Deslocamento máximo para varias espessuras de vidro, aplicando várias forças.

O dado importante que se retira deste gráfico é o comportamento do conjunto em função da espessura. O importante não será a espessura do vidro pois provoca a mesma deformação para a mesma força. Por outras palavras na mesma análise (mesmas cargas aplicadas) as tensões resultantes serão iguais e independentes da influência da espessura dos vidros já que estas dependem exclusivamente dos deslocamentos. Para a suposição anterior é necessário excluir a variação de força provocada pela diferença de peso do vidro, pois o seu peso comparativamente com toda a estrutura é infinitesimal.

## Módulo de Young Utilizado

O módulo de Young é calculado em função das dimensões do vidro. No caso as dimensões consideradas são baseadas nas dimensões mais dominantes, 1170x1130mm. As espessuras são diferentes; no caso dos vidros é de 5mm enquanto no para brisas é de 7mm. A verdade é que simplificações tem que ser feitas e portanto mais uma vez a espessura dominante é 5mm.

O módulo de Young deveria ser calculado para as duas direcções, no entanto, e por simplificação será considerada apenas a longitudinal já que os afastamentos dos pilares são mais significativos nesse plano.

O módulo utilizado para o vidro é de 46GPa enquanto para a cola (Sikaflex) retirada de catálogo é de 1,5MPa.

O valor calculado utilizado é de 0,32GPa, muito longe dos 0,0024GPa calculado em trabalho anterior por A. Moraes, [2].

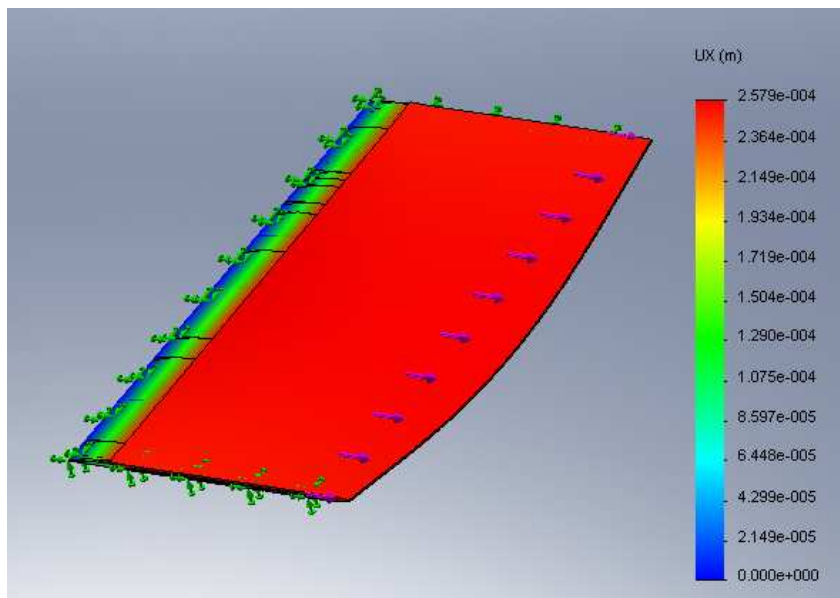


Figura 35 – Resultados do ensaio para determinar o Módulo de Young utilizado no cola-vidro

Como provável resultado é uma estrutura mais travada, sendo que o estudo também será efectuado tendo em conta o valor utilizado por A. Moraes, [2], como forma de comparar resultados como os obtidos anteriormente, mas também como forma de maximizar os esforços na estrutura resistente.



## **4 - Metodologia de Trabalho**

A estratégia é muitas vezes importante no que toca a desenvolver um projecto novo. Na chegada à empresa apercebi-me de que o que havia para aprender é tanto que por vezes nem se sabe por onde começar. O desenvolvimento de novos produtos, como veremos adiante, depende de imensos factores, que nunca conseguimos controlar completamente. É importante conhecer a empresa e os métodos de trabalho nela existentes.

A antecipação de trabalho é muito importante e requer uma capacidade de integração considerável. É importante conhecer a fundo o produto que se desenvolve ou ajuda a desenvolver, sendo o tempo um factor muito importante.

O desenho da estrutura resistente (carroçaria) é geralmente baseado numa estrutura típica já existente que é adaptada a um chassis comprado segundo imposições do regulamento do fabricante do chassis ou do regulamento ECE66. Esta estrutura depende do tipo de autocarro, urbano, interurbano ou de turismo por exemplo. Esta estrutura é composta por estrado, painéis laterais, frente, traseira, tejadilho e revestimentos (chapas e fibras).

No caso o estudo destas estruturas, através de modelos existentes, permitiu-me antecipar o estudo para a nova estrutura a ser construída para o modelo Urbano.

É necessário que os perfis estejam posicionados correctamente. Por esta razão foi criado um modelo de linhas que me permitiu introduzir mais rapidamente os elementos tipo “beam” e “shell” utilizando o “fim” das linhas para posicionamento dos nós do elemento. Esta solução teve como objectivo permitir fáceis alterações de posicionamento ou mesmo mudar nós.

Por outro lado é necessário saber muitas vezes o peso dos componentes mais importantes, como peso do depósito de combustível, radiador, portas automáticas, ar condicionado, entre outros. A sua posição, centro de massa, é extremamente importante pois dela dependem esforços impostos à estrutura resultantes da sua massa. No caso é difícil saber estes pesos pois quase nenhum destes componentes este disponível ou o seu catálogo não o refere, ou mesmo porque ainda não está decidido.

Estes elementos não resistentes são geralmente modelados como perfis curtos de maior rigidez, de forma a não afectar o cálculo, alterando a sua densidade de forma a obter o seu peso correcto, nomeadamente as portas ou a cadeira do motorista por exemplo. Noutros casos é alterada a densidade do elemento ao qual está ligado o componente. Por exemplo o ar condicionado é “adicionado” a alguns perfis do tejadilho, não havendo informação da sua rigidez e resistência é lógico que a sua massa esteja distribuída pelo tejadilho.

O auxílio ao desenvolvimento é importante na medida em que permite antecipar alguns problemas resolvendo-os em fase de projecto evitando custos avultados, mantendo a imagem da empresa e originando produtos de qualidade.

## **Validação do Modelo**

Um modelo numérico só será válido se corresponder ao modelo real. É necessário que a modelação seja o mais aproximada possível com o modelo real, e ao mesmo tempo é necessário aproximar as condições fronteira e cargas de solicitação de forma a que sejam o mais próximo possível da realidade. Esta condição poderá ser muito difícil de atingir, e a transposição de um caso real é geralmente baseada em simplificações, por exemplo numa análise de uma ligação entre vários perfis um deles terá que ser encastrado e os outros sujeitos a cargas conhecidas, quando na verdade esse encastramento perfeito não existe. Poderá ser difícil identificar o perfil mais aproximado do encastramento, sabendo que na verdade este não existe.

A validação do chassis assenta no conhecimento de dados técnicos fornecidos pelo fabricante, pesos e centro de gravidade dos módulos, por exemplo. Torna-se mais difícil determinar a veracidade das tensões nos elementos resistentes da carroçaria, não obtendo um valor quantitativo mas sim qualitativo, devido à inexistência de uma comparação entre o modelo real e um modelo de elementos finitos. O que se obtém é uma relação de tensões entre perfis mas que poderá não corresponder a uma tensão real.

A Exensometria é uma técnica de medição experimental de tensões, que reproduz valores fiáveis quando bem manuseada, e que apoia a validação deste tipo de modelos. A possibilidade de efectuar um estudo num autocarro, modelo Levante Lite, em fase de fabrico atreves deste método permitiria tirar uma relação entre o quantitativo e o qualitativo, isto é, permitiria tentar obter uma relação entre valores medidos em extensometria e valores calculados por elementos finitos.

A análise de tensões consiste fundamentalmente em determinar o estado de tensão num ou vários pontos duma estrutura, a partir de um conjunto de condições que incluem a sua geometria, as suas ligações ao meio exterior e o tipo de solicitações a que está submetida. Se o estado de tensão num ponto é determinado recorrendo de alguma forma à utilização de grandezas medidas experimentalmente, então o processo é designado como um método de análise experimental de tensões. Uma das grandezas mais frequentemente medidas em análise experimental de tensões é a deformação ou extensão linear, a partir da qual se passa depois para as tensões, recorrendo às equações da teoria da elasticidade.



## Extensometria

Os cálculos efectuados neste tipo de análise têm um aspecto mais qualitativo e menos quantitativo. O objectivo de estudar o estado de tensões num ponto do autocarro permitiria depois partir para uma relação entre o valor obtido por cálculo de elementos finitos e o valor medido por extensometria num modelo à escala real. O ideal seria medir em mais do que um perfil de forma a determinar se a relação seria constante. A medição deverá permitir obter deformações devidas ao esforço normal, de corte, sendo que deveria serem utilizadas rosetas em pelo menos um ponto.

Foram feitas algumas modificações ao modelo para poder obter um modelo o mais fiel ao real. Foi retirado o peso do motorista, os bancos, alterada a massa da plataforma elevatória e também a existência de um motor e caixa mais leve. Mais tarde verificou-se também a existência do condicionado mais leve.

Após algum estudo, e devido ao modelo real estar em fase de acabamento, os locais possíveis para colar os extensómetros são apenas nas travessas da bagageira (a violeta na figura seguinte).

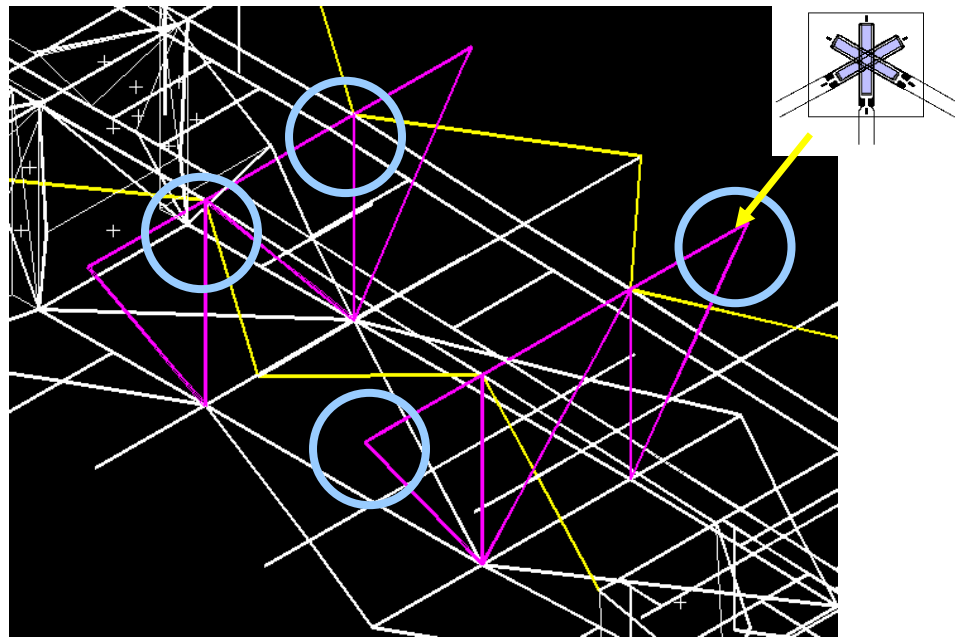
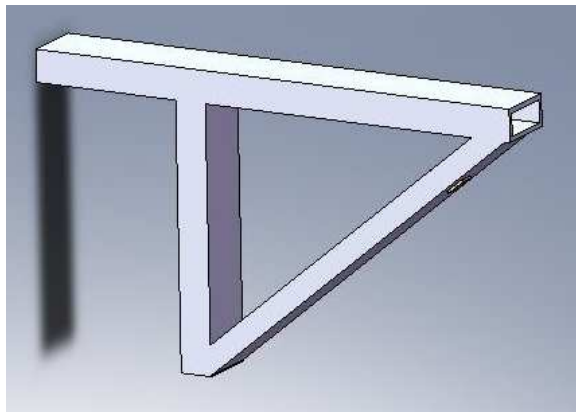


Figura 36 – Modelo em StressLab indicando as diagonais em estudo

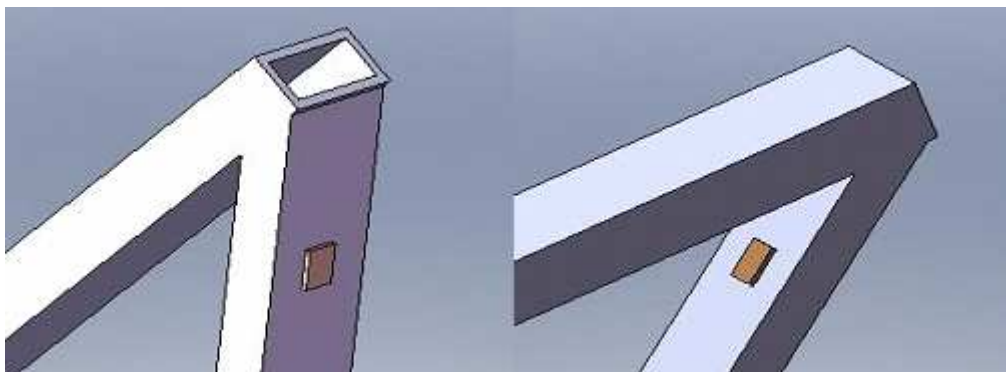


**Figura 37 – Autocarro alvo do estudo de extensometria**

Já no ensaio duas rosetas foram colocadas na face a 200mm do eixo do tubo superior. Os resultados são obtidos transformando as micro-deformações em tensões principais no ponto.



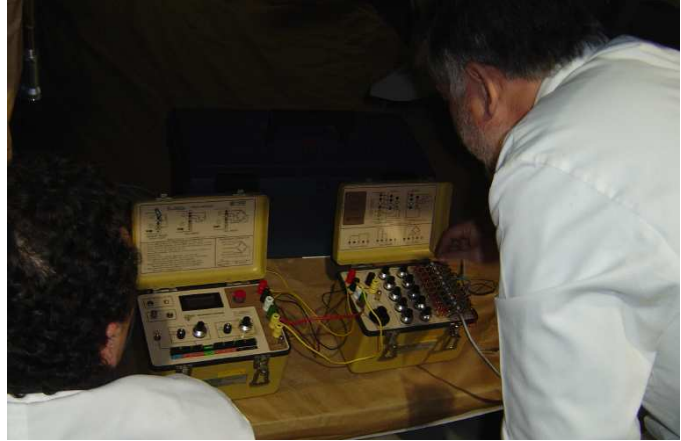
**Figura 38 – Modelação em SolidWorks da simulação**



**Figura 39 – Posição das duas rosetas nos perfis das diagonais em estudo**

É necessário fazer uma manipulação algébrica para obter os valores correctos. Na verdade os valores medidos pelo extensómetro são a diferença entre o estado de tensão do estado de ensaio (uma roda livre) e o estado de repouso em que a estrutura esta sob tensão devido ao peso das várias estruturas e componentes

A extensometria é uma técnica largamente utilizada que geralmente produz resultados satisfatórios comprovados. No entanto a revelação dos resultados revela-se não tanto encorajadora. Foram efectuados três medições, havendo para a segunda dois registos. O valor da deformação está registada na tabela seguinte em micro-deformações. As deformações na direcção b ( $\epsilon_b$ ) são medidas longitudinalmente em relação à barra. As outras duas são as direcções correspondentes a uma roseta de 45 graus, e estão registadas para as duas rosetas na seguinte tabela:



**Figura 40- Montagem e calibração do equipamento de medição**

		$\epsilon_b$	$\epsilon_a$	$\epsilon_c$	$\epsilon_b$	$\epsilon_a$	$\epsilon_c$
		Posterior			Frente		
Extensómetro		5	6	7	8	9	10
1ª Medição	0	-30	4	-10	40	60	90
	1	-56	-17	-12	-12	107	170
	$\Delta$	-26	-21	-2	-52	47	80
2ª Medição	0	0	10	-12	-30	-27	-50
	1	-65	-6	-11	-30	-70	-10
	$\Delta$	-65	-16	1	0	-43	40
	2	-50	-18	9	-16	-70	50
	$\Delta$	-50	-28	21	14	-43	100
3ª Medição	0	35	10	-28	-17	12	80
	1	-2	-13	-32	-13	-16	78
	$\Delta$	-37	-23	-4	4	-28	-2
Média		-44,5	-22	4	-8,5	-16,8	54,5

**Tabela 4 – resultados da micro-deformações do estudo de extensometria no modelo Levante Lite**

As tensões principais são calculadas directamente pelas expressões:

$$\sigma_1 = E \left\{ \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2(1+\nu)} + \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c)^2} \right\}$$

$$\sigma_2 = E \left\{ \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_c}{2(1+\nu)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c)^2} \right\}$$

Estes foram os resultados para os dois extensómetros:

$\sigma_1$ (MPa)	4,6
$\sigma_2$ (MPa)	-7,4
$\sigma_1$ (MPa)	10,1
$\sigma_2$ (MPa)	-4,1

Pelo critério de resistência de Tresca, a tensão equivalente será dada pela diferença das tensões principais:

Os resultados foram 12MPa para o primeiro e 14 para o segundo.

O resultado de cálculo por elementos finitos revelou tensões para esses pontos de 18 e 21 MPa. Apesar de os resultados serem da mesma ordem de grandeza, apresentam grande dispersão, como se observa no Gráfico 4.

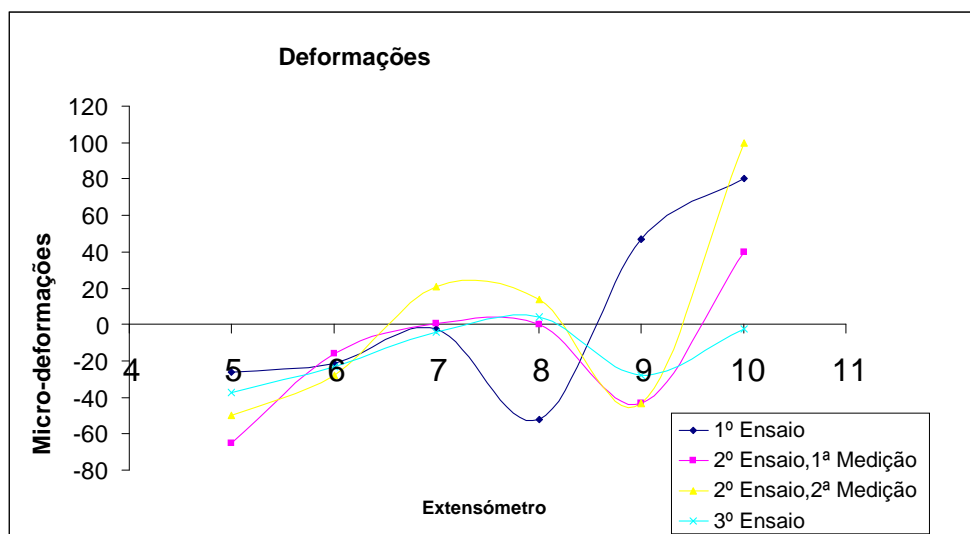


Gráfico 4 – Deformações para os vários extensómetros das duas rosetas, nos três ensaios

Os extensómetros 5, 6 e 7 pertencem a uma roseta, e o 8, 9 e 10 à segunda roseta. Os extensómetros 5 e 8 são os alinhados longitudinalmente pelo tubo. No gráfico constata-se uma grande dispersão de deformações, embora algumas medições tenham um comportamento idêntico. Estes resultados de extensometria não deverão ser tomado como válidos, devendo ser encarados com prudência. Os resultados teóricos são mais altos, como seria de esperar, já que a estrutura na realidade tem chapas de reforço, soldaduras reforçadas e como consequência da simplificação de modelação.

Algumas causas serão apontadas para estes resultados:

- Baixas tensões devido a uma zona travada, bastante mais leve, modificações de pesos (motor, AC, plataforma elevatória, ausência de motorista);
- Ruído ambiental, afectando as baixas tensões eléctricas;
- Má soldadura nos pólos do extensómetro, criação de resistência, afectando as correntes eléctricas, bem como ausência do terceiro fio para medir a resistência dos cabos ainda que curtos;
- Correntes de ar;
- Influência da suspensão;
- O segundo ensaio teve duas medições espaçadas por alguns segundos, revelando medições diferentes, o que pode sugerir algumas circunstâncias como: reajustamento da suspensão/ estruturas (borrachas) ou um ligeiro escorregamento entre a superfície e o extensómetro por intermédio do polímero de colagem.

Este estudo é de grande relevo potencial, mas no entanto não produziu os resultados que se esperaria. No entanto pode abrir perspectivas a novos estudos em pontos onde os níveis de tensão sejam superiores, como por exemplo os pilares junto das portas.

## Modelação – Urbano

Um autocarro urbano é um modelo destinado a circuitos citadinos, onde o importante é transportar o número máximo de passageiros possível em segurança. Um autocarro divide-se em várias partes, chassis, estrado, pavimento, painéis laterais, frente, traseira, tejadilho, revestimentos (pecolite, chapeamentos, fibras de estética) e vidros.

A modelação deve ter em atenção muitos aspectos de forma a validar o modelo. Seguidamente as considerações e características de cada grupo constituinte serão apresentadas seguidamente.

As estruturas que suportam o autocarro são o estrado e o tejadilho, e estes normalmente são ligados pelos pilares entre outros perfis. Verifica-se na análise que os pilares das portas são os mais solicitados, isto porque estão na zona mais “fragilizada”, menos travada e com perfis mais longos. Perfis longos têm tendência a transmitir menos esforços, e quando comparados com elementos mais curtos de secção igual possuem menor rigidez. Os pilares são os responsáveis pela integridade e segurança limite no caso de um capotamento. A sua escolha é de extrema importância, o objectivo é uniformizar as tensões máximas nunca passando a tensão dos pilares, pois são os elementos que nunca deverão “ceder”.

### Chassis

O chassis é uma importante estrutura resistente de um autocarro, pois suporta toda a estrutura resistente da qual também faz parte. Embora o interesse não resida em estudar este conjunto, pois é fornecido pela SCANIA, a sua correcta modelação é importante. Um chassis é composto por vários componentes cujas massas estão distribuídas em diferentes pontos contribuindo de maneiras diferentes em função da sua posição e massa para o comportamento da estrutura. Muitos componentes são o motor, caixa de velocidades, diferencial, rodas (jante e pneu), semi-eixos entre muitos. Na verdade a sua pesagem não foi possível para todos os componentes. Foram pesados alguns (motor e caixa idênticos), alguns resultam de dados anteriores) e outros foram obtidos por estimativa. É de salientar que o chassis não esteve disponível e que por isso atrasou o processo de modelação já que a informação do fabricante é insuficiente devido à falta de detalhe.

Um modelo de chassis de três eixos destinado a um autocarro de dois pisos, idêntica na forma de construção ao que será possivelmente utilizado no Urbano serviu de modelo para retirar informação, nomeadamente medições directas e maior e melhor detalhe do chassis, principalmente do módulo da frente que se supõe igual.

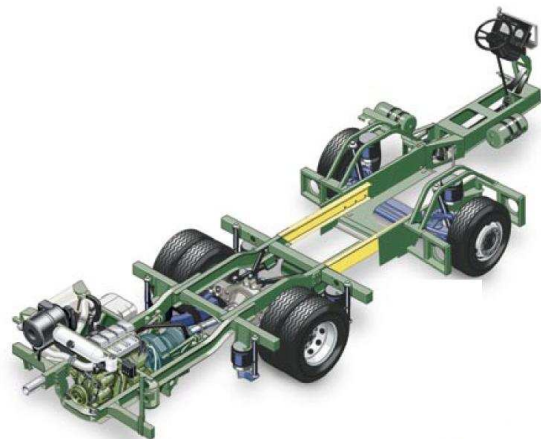
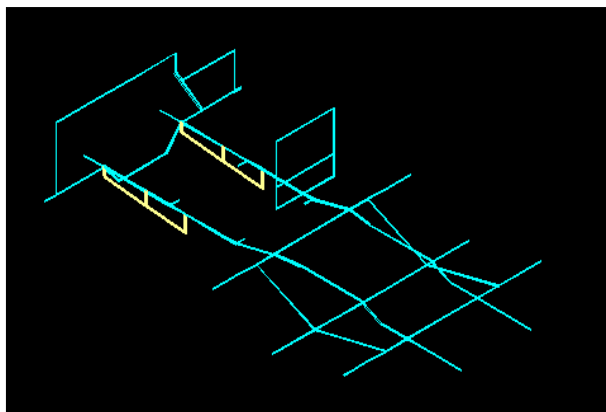
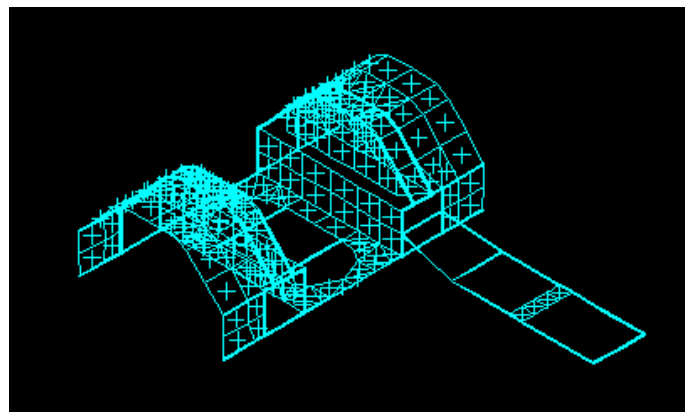


Figura 71 – Modelo de chassis K210 da SCANIA

## Modelação do Chassis



**Figura 42 – Modelação dos módulos de trás do chassis**



**Figura 43 – Modelação dos módulos da frente do chassis**

É a primeira estrutura a ser modelada e a sua validação, quer em garantir a posição do centro de massa quer em garantir a sua massa correcta, depende de alguma manipulação em termos de densidades de material.

O módulo traseiro comporta muitos componentes como é o caso do motor, diferencial e radiador etc. O peso de alguns componentes como o motor e caixa foi determinado por pesagem de um idêntico existente nas instalações. Aos seus 1500kg ainda é necessário adicionar o peso dos seguintes componentes:

### Peso dos componentes

		Massa (kg)
Eixo Traseiro		
	Pneus + Jantes	400
	Cubos e outros	100
	Semi-eixo	34
	Diferencial	280
Sacos Pneumáticos		200
Motor e Caixa Velocidades		1500
Radiador		60
Reservatório ar Comprimido		10
Total		<b>2584</b>

**Tabela 5 – Peso dos vários componentes a considerar para o módulo traseiro do chassis**

Alguns perfis de densidade alterada foram utilizados para simular estes componentes. Noutros casos foram alteradas as densidades do perfil ao qual estavam ligados, somando-lhes o seu peso.

Em ambos os casos, módulo da frente e traseiro, as densidades dos perfis foram, alteradas até obter a posição correcta para garantir a posição de massa, bem como o seu peso total.

O chassis completo tem esta posição final.

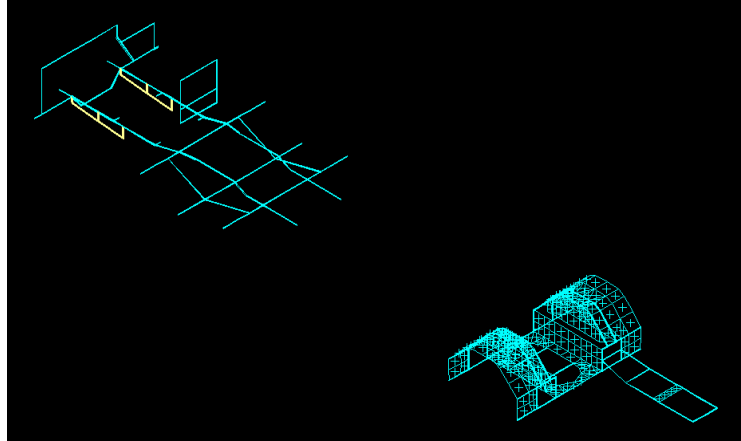


Figura 44 – Posicionamento dos dois módulos do chassis

### ***Alongamento***

O alongamento é a estrutura que liga os dois módulos do chassis e é por isso uma estrutura composta por elementos resistentes bastante robustos. A sua função é também sustentar os pilares, parte do estrado e ainda o pavimento, onde geralmente há maior concentração de pessoas, quer de pé quer sentadas.

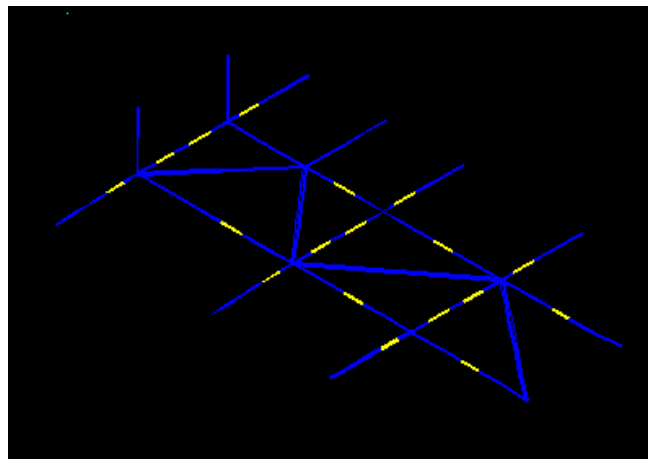


Figura 45 -Alongamento



## Estrado

O estrado é uma importante estrutura resistente de ligação. Interligam os módulos do chassis e o alongamento aos painéis. É composto por perfis resistentes e algumas chapas finas de aço. A eles estão ligados os bancos, estrutura que deve ser resistente por razões de segurança, já que o regulamento ECE 66, [1], exige boas ligações de dos bancos à estrutura.

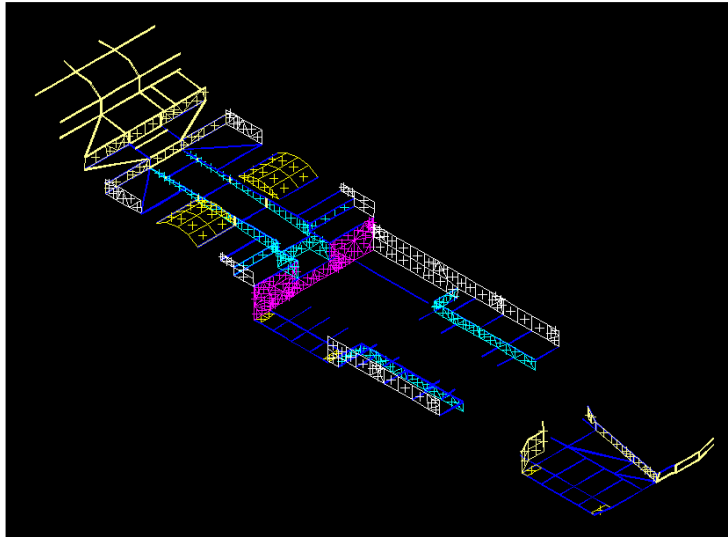


Figura 46 – Estrado completo

## Pavimento

O pavimento é composto por madeira coberta com tapete. Na zona traseira, a espessura da madeira de 18mm por razões de isolamento como forma de aumentar a insonorização ao ruído provocado pelo motor. Na zona mais baixa do pavimento a espessura do pavimento é de 15mm. Em ambos os casos a espessura do tapete anti-derrapante é de 2,25mm.

As características utilizadas são retiradas de dados fornecidos pelos fabricantes.

### Madeira

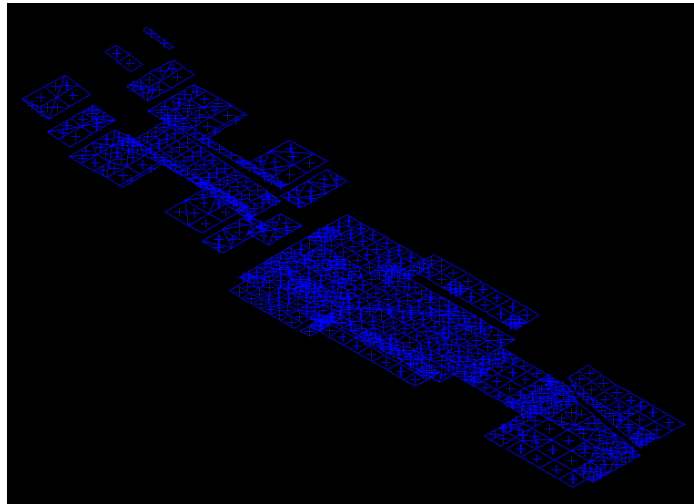
Modulo de Young (GPa)	12
Coefficiente de Poisson	0,4
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	960

Tabela 6 – Características da madeira utilizada

No caso do tapete anti-derrapante, modelo TARABUS da Gerflor, a sua densidade é de  $2,75\text{kg/m}^3$ .

A área de superfície da madeira é aproximadamente 20,5 metros quadrados perfazendo assim cerca de 56,8kg de tapete.

A função do tapete não é estrutural e desta forma a densidade da madeira é alterada de forma a considerar o peso do tapete. No caso é necessário considerar as duas áreas para a madeira de 15mm e 18mm. É adicionada a massa do tapete à massa da madeira e depois dividida pelo volume da madeira correspondente.



**Figura 47 – Pavimento completo**

### ***Painéis***

Os painéis são a estrutura na qual existem os pilares, elemento de ligação entre estrado, chassis, alongamento, sendo o único elemento a ligar o tejadilho a estas estruturas. Ajuda a suportar o motor e é geralmente uma estrutura muito travada em baixo. A sua escolha pode determinar muitas consequências como vimos anteriormente (autocarros com pilares fracturados) e é um importante factor na segurança em caso de capotamento. Esta estrutura suporta estruturas tais como portas e mecanismos das portas, é um dos pontos de aperto dos bancos, e suporta os vidros. Através dos pilares suporta a estrutura do tejadilho, o Pecolite (fibras de revestimento do tejadilho) o ar condicionado e respectivas condutas e alguns revestimentos.

### Painel Direito

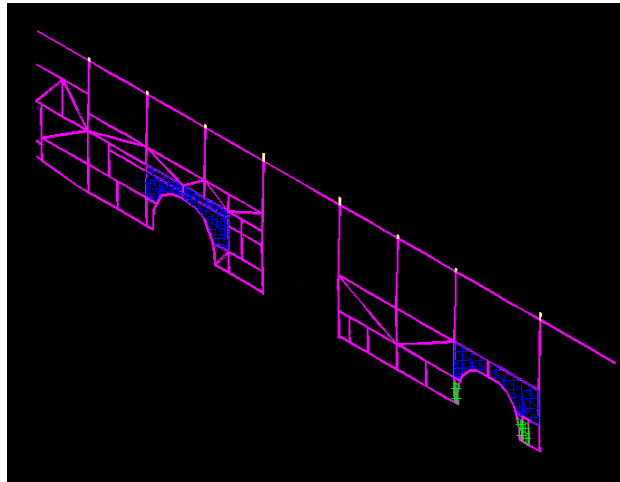


Figura 48 – Painel Direito

### Painel Esquerdo

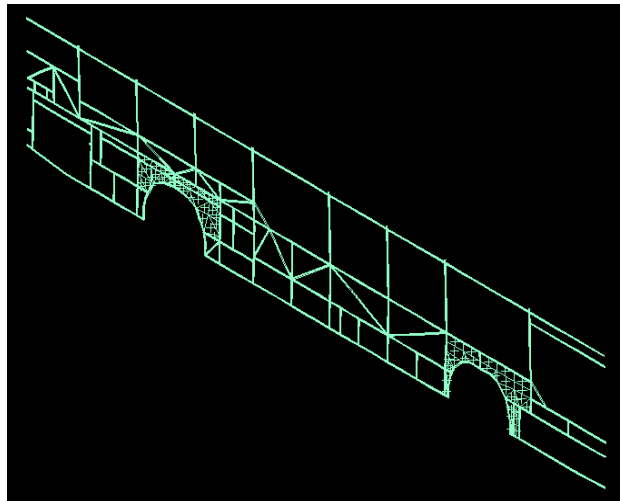


Figura 49 – Painel Esquerdo

### Tejadilho

O tejadilho é a estrutura que suporta o Pecolite e o ar condicionado. A sua estrutura é extremamente importante, pois é um elemento de ligação. Um tejadilho muito rígido fará com que ocorram tensões levadas nos pilares, pois estes têm que se acomodar à deformação da zona inferior (chassis, alongamento e estrada). No caso de ser muito flexível as tensões nos pilares serão muito mais baixas, pois deixaram que estes sigam a deformação do tejadilho fazendo com que as tensões fiquem mais localizadas na zona inferior.

No capotamento, juntamente com os pilares é uma importante estrutura pois ajuda a garantir a zona de segurança.

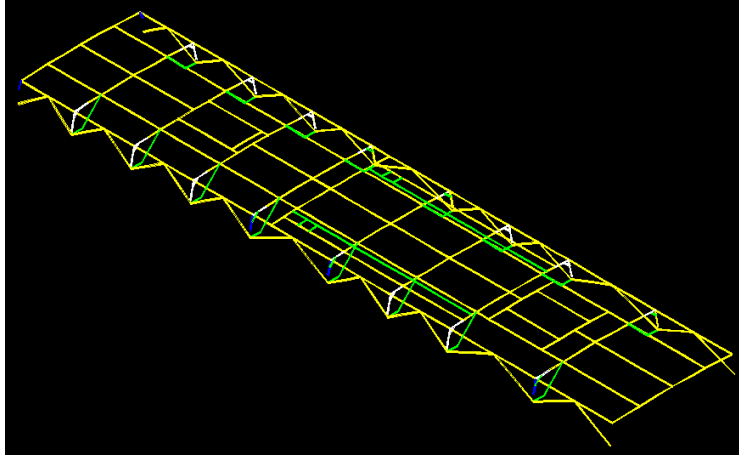


Figura 50 -Tejadilho

### ***Pecolite***

O Pecolite é um revestimento de fibras de vidro, que revestem a zona do tejadilho. A zona a branco é a zona onde se situa o ar condicionado. O ar condicionado é geralmente colado ou aparafusado. Inicialmente o seu peso foi adicionado ao Pecolite, mas devido à baixa rigidez a sua deformação era excessiva, sendo por isso modificada a forma de modelação do ar condicionado.

As suas características são as seguintes:

#### **Pecolite**

Modulo de Young (GPa)	8,5
Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade (kg/ m <sup>3</sup> )	1400

Tabela 7 – Características do Pecolite

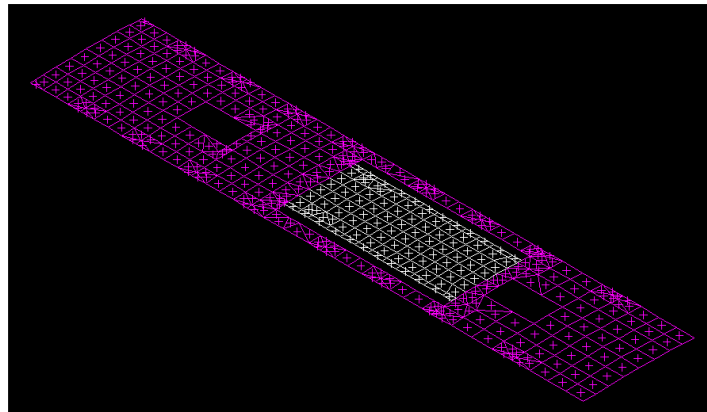
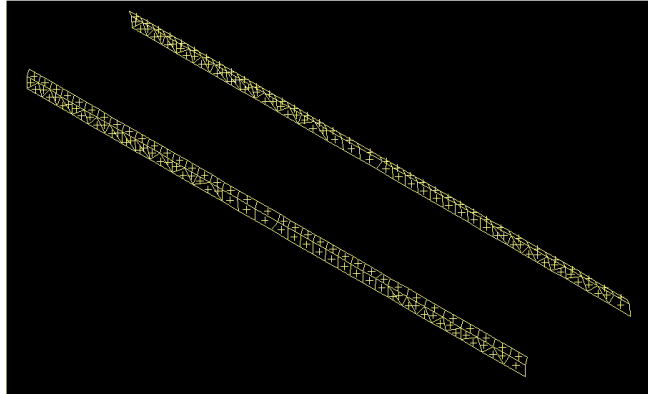


Figura 51 – Pecolite

## ***Sanca***

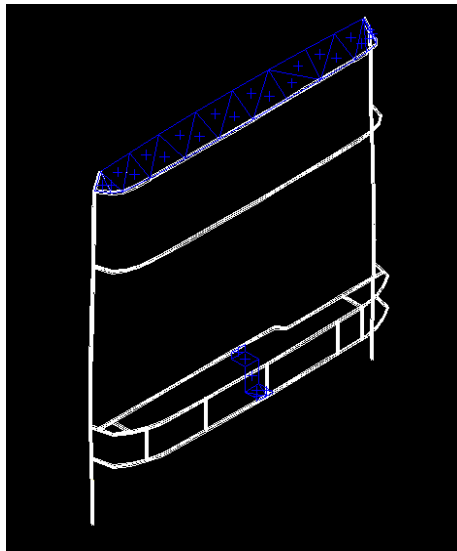
A Sanca é uma casca de alumínio de 1,25mm que serve de revestimento entre o topo dos vidros e o Pecolite. Possuindo uma forma ovalizada a sua função é mais estética do que estrutural.



**Figura 51 – Sanca**

## ***Frente***

A frente é uma estrutura simples que se destina a ostentação de painéis de instrumentos, pára-brisas, revestimentos, sistema limpa vidros faróis, fibras entre outros. É uma estrutura simples, composta por poucos perfis e estruturalmente comum a vários modelos de urbano. Tal como a face de um cubo a ele ligam os painéis (principalmente o esquerdo) o tejadilho e as blindagens que ligam ao estrado.



**Figura 52 – Frente**

## Traseira

Tal como a frente é uma estrutura simples e geralmente de desenho comum a vários modelos urbanos. Suporta os vidros traseiros, algumas fibras, faróis e a ele ligam o estrado, os painéis laterais, e o tejadilho.

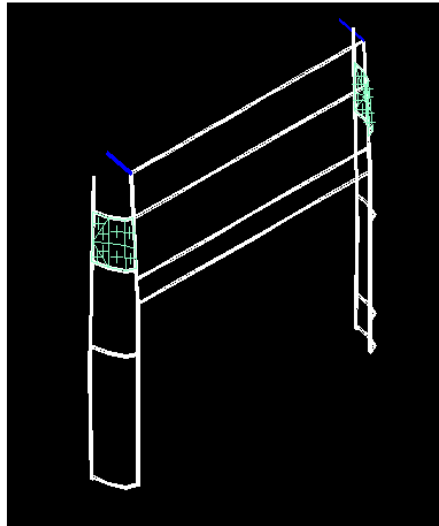


Figura 54 -Traseira

## Bancos

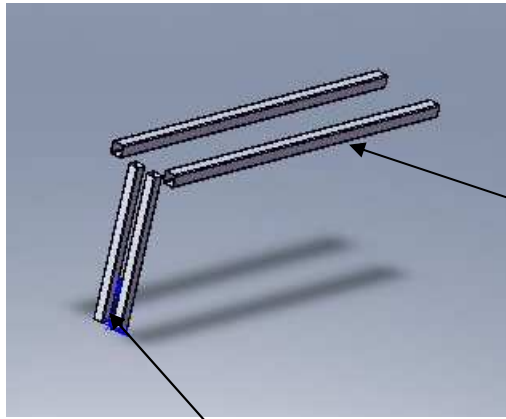
Os bancos são uma estrutura composta por perfis metálicos, fibras e tecidos. A sua estrutura é muitas vezes de complexa modelação, mas é inegável que contribui de alguma forma para a rigidez do conjunto. Estão ligados ao estrado e ao painel lateral e a sua contribuição tem que ser introduzida quer em termos de peso que em peso de estrutura.

Inicialmente o modelo escolhido terá sido este modelo da Soriac, representado na Figura 55.



Figura 55 - Bancos

No entanto o modelo foi posteriormente alterado para o modelo Urban90 já utilizado na Carris de Lisboa. De forma a introduzir uma estrutura resistente para o banco, foi utilizada a estrutura do modelo da Soriac, com perfis 25x25x1,5 e 30x30x2.



A	4,31	cm <sup>2</sup>
I <sub>y</sub>	5,92	cm <sup>4</sup>
I <sub>z</sub>	247,86	cm <sup>4</sup>
I <sub>t</sub>	9	cm <sup>4</sup>

Figura 55 – Perfis utilizados na simulação dos bancos

A	2,72	cm <sup>2</sup>
I <sub>y</sub>	19,42	cm <sup>4</sup>
I <sub>z</sub>	2,47	cm <sup>4</sup>
I <sub>t</sub>	3,98	cm <sup>4</sup>

Quanto a pesos de bancos, apenas é referido o peso de um banco duplo cerca de 20 kg, no caso do individual, o peso é arbitrado para 13,5kg. As densidades dos elementos são alteradas para atingir estes valores. No caso existem 29 lugares sentados, 13 dos quais duplos, totalizando cerca de 340 kg. Os elementos correspondentes aos bancos estão divididos de forma a introduzir no centro de gravidade correcto cada força correspondente ao peso de uma pessoa, considerado 68kg.

O banco do motorista é estabelecido em cerca de 60kg e é modelado por perfis resistentes 30x30x2.

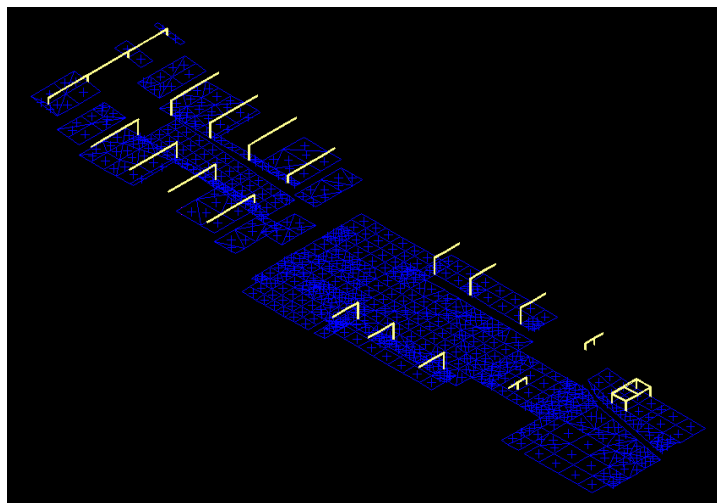
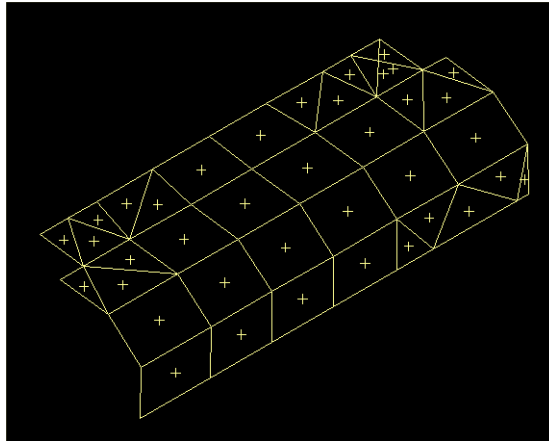


Figura 56 – Posicionamento dos bancos em relação ao pavimento do autocarro

### ***Almofada Traseira***

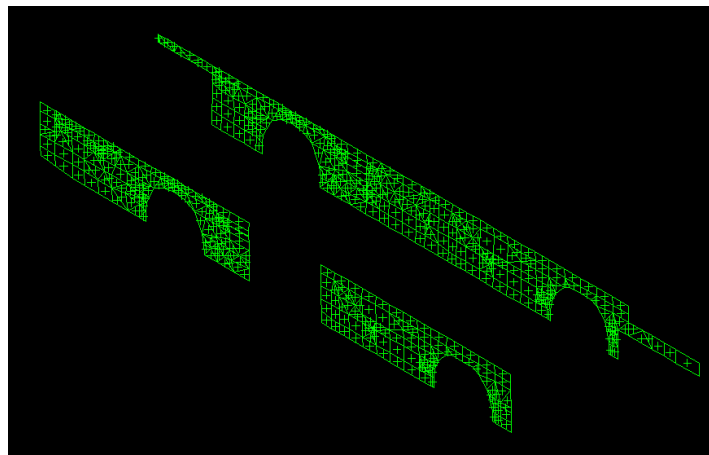
A almofada traseira é uma chapa de pequena espessura que reveste o motor e isola o ruído do habitáculo. Geralmente tem elementos isolantes quer do som quer do calor produzido pelo motor em funcionamento. Devido a serem materiais de muito baixa densidade, optou-se por não os introduzir.



**Figura 57 – Almofada Traseira**

### ***Chapeamento exterior***

O chapeamento exterior é constituído por chapa de 1,25mm e é soldada nos topos e colada junto aos vidros e encaixada num perfil inferior. Optou-se por o modelar como soldado à estrutura por questões de simplificação, pois por ser soldado nos topos ajuda a travar a estrutura inferior no seu plano longitudinal.

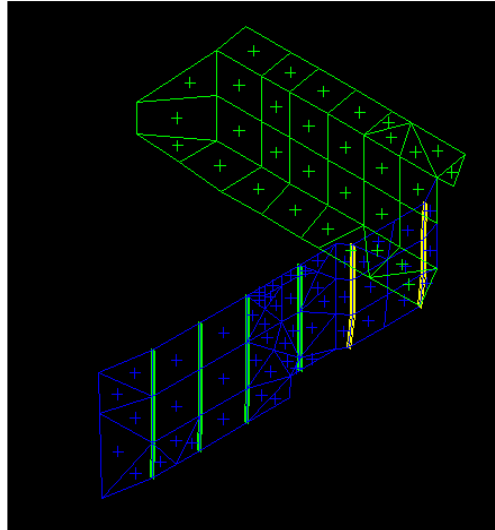


**Figura 58 – Chapeamento exterior**

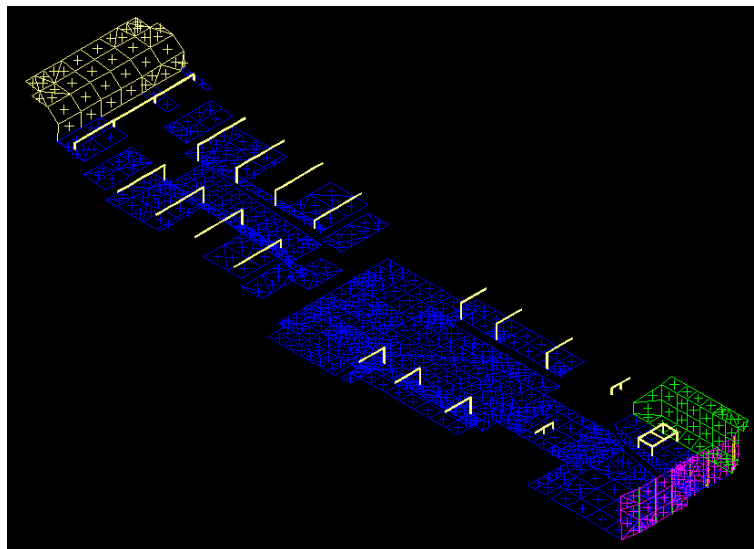


### ***Blindagens Frente e Motorista***

As blindagens são estruturas de revestimento possuindo perfis resistentes de ligação e chapas de 2mm de espessura na frente e 1,25mm na lateral. Servem para proteger o condutor de embates frontais, pois a segurança é extremamente importante no caso de um embate frontal.



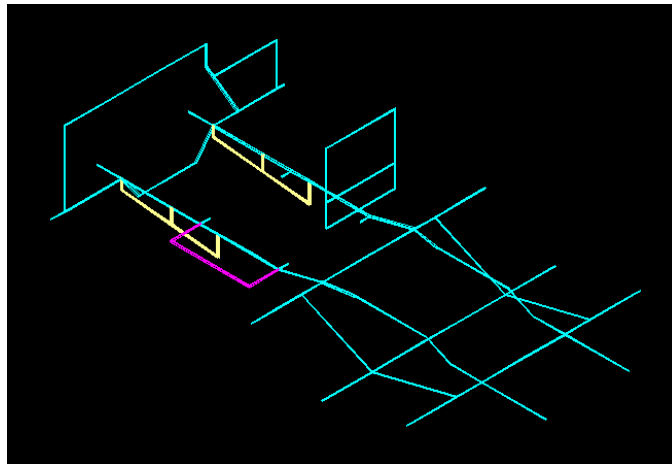
**Figura 59 – Blindagens do motorista e frente**



**Figura 60 – Posicionamento de algumas partes do autocarro**

### ***Depósito de Combustível***

O depósito de combustível é um componente com massa significativa que necessita ser considerado. No total considera-se 23kg do depósito, sendo que o gasóleo pesa cerca de 253,5kg correspondendo a 300 litros. A sua modelação baseou-se no cálculo de peso de um depósito de 400 litros existente num chassis do mesmo fabricante.



**Figura 61 – Posicionamento do depósito de gasóleo e sua modelação**

### ***Portas***

As portas automáticas constituem peso geralmente distribuindo ou pelos pilares das portas, no topo superior ou pela zona próxima ao perfil na zona inferior. No caso optou-se por modelar este componente como um perfil curto de forma a pesar cerca de 50kg cada, peso arbitrado, considerando que 60% do peso está em cima (devido aos motor) e 40% está na zona inferior junto ao pavimento.

### ***Ar condicionado***

O ar condicionado é uma estrutura que está colada ou aparafusada ao tejadilho. É mais uma sobrecarga para os pilares e a sua contribuição é por isso importante. Inicialmente o ar condicionado por ser colado foi introduzido na densidade do Pecolite na correspondente área. Devido à baixa rigidez deste material, foi adicionado aos perfis do tejadilho na área correspondente. A zona a magenta, na Figura 66, corresponde ao ar condicionado contribuindo com 220kg adicionados ao peso dos perfis já existentes.

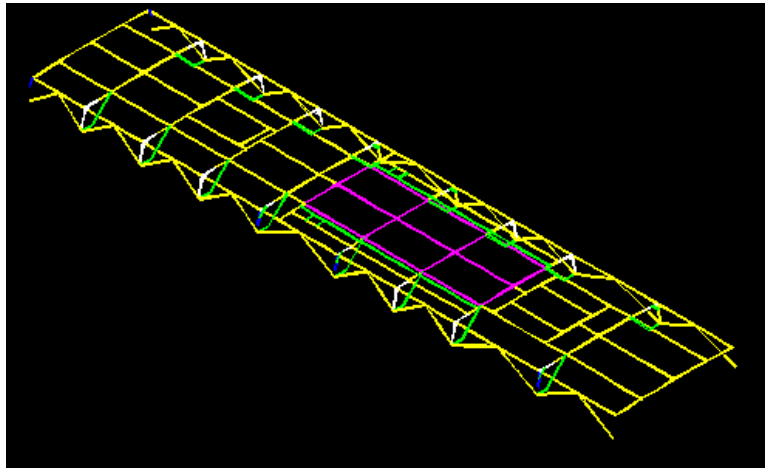


Figura 62 – Posição do ar condicionado (a cor magenta)

### *Passageiros*

Os passageiros são uma sobrecarga importante na estrutura. Contribuem com peso muito significativo para o conjunto. A lotação completa representa quase 39% do peso bruto do veículo. Os passageiros são modelados como forças correspondendo a 68kg cada um, sendo o valor médio considerado no anteprojecto. As forças correspondentes aos passageiros de pé são introduzidos nos nós do estrado de forma a satisfazer a condição de distribuição de massas pelos eixos retiradas do Anteprojecto bem como a respeitar o número de pessoas impostas para cada zona do autocarro. No caso dos passageiros sentados são colocados na posição do banco, onde previamente foi colocado um nó.

### **Lotação de Pé – 72 Passageiros**

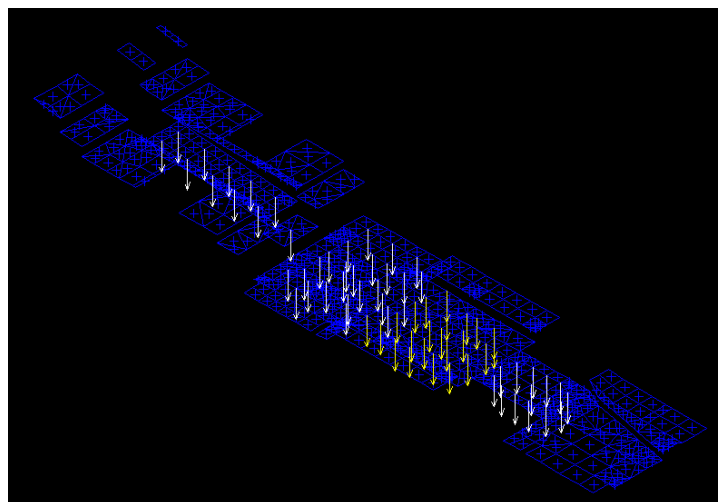
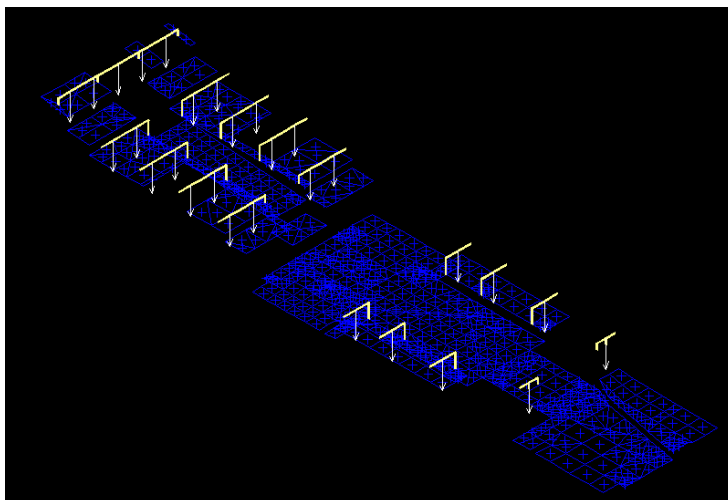


Figura 63 – Simulação de pessoas de pé por forças

## **Lotação Sentado – 29 Passageiros**



**Figura 64 – Simulação de pessoas de pé por forças**

## As condições fronteira

As condições fronteira são estabelecidas de forma a aproximar o estudo a uma situação que se considera limite. No estudo considera-se uma das rodas livre simulando por exemplo uma subida de um passeio, sendo esta a pior situação a que este tipo de estrutura pode ser submetido.

Sendo a estrutura não simétrica no plano longitudinal do autocarro é necessário estabelecer condições fronteira para que o autocarro apenas se desloque na vertical, colocando-lhe restrições para que isso aconteça. Na figura seguinte estão representados as restrições utilizadas para a pesagem. Retirando uma das restrições da frente é considerado o caso de estudo: o autocarro apoiado em três rodas, quer à direita quer à esquerda.

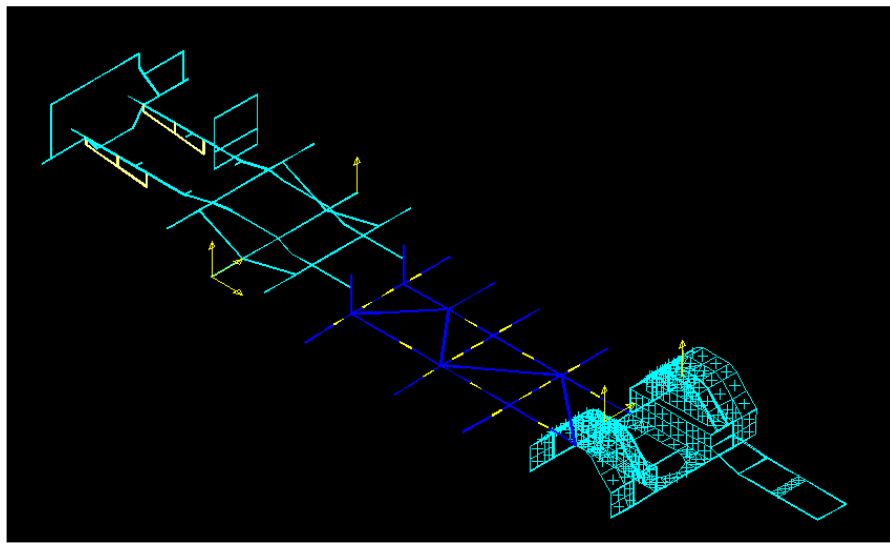


Figura 65 – Condições Fronteira

## Validação do modelo

### *Validação do chassis*

Como já vimos a distribuição de massas é muito importante. Por esta razão é necessário validar o chassis. Esta validação passa por garantir a posição de massa relativamente a cada um dos centros de gravidade de cada módulo. É feita a modelação dos elementos resistentes bem como a modelação de alguns componentes cujas massas já são conhecidas ou foram determinadas em situações anteriores.

## Módulo da Frente

Para o módulo da frente apenas considero 80kg de duas baterias colocadas na frente do módulo.

Módulo		Posição do CG (cm)			Peso (kg)
		x	y	z	
Frente	Real	939,5	135	58	1600
	StressLab	939,45	135,15	58,29	1601,3
	$\Delta$	0,05	-0,15	-0,29	-1,3
	%	0,005	0,111	0,500	0,081

Tabela 8 – Comparação da posição do centro de gravidade do módulo da frente

## Módulo Traseiro

Os componentes considerados mais significativos são os seguintes:

		Massa (kg)
Eixo Traseiro		
	Pneu + Jante	400
	Cubos e outros	100
	Semi-eixo	34
	Diferencial	280
Sacos Pneumáticos		200
Motor e Caixa Velocidades		1500
Radiador		60
Reservatório ar Comprimido		10
Total		<b>2584</b>

Tabela 9 – Pesos de alguns componentes do módulo traseiro

A posição do centro de gravidade é determinada sendo que por vezes é difícil de obter correctamente. O módulo foi dividido em várias densidades de forma a corrigir o centro de gravidade.

Módulo		Posição do CG (cm)			Peso (kg)
		x	y	z	
Trás	Real	212	130,5	65	3760
	StressLab	211,64	130,3	61,46	3766
	$\Delta$	0,36	0,2	3,54	-6
	%	0,170	0,153	5,446	0,160

Tabela 10 – Comparação da posição do centro de gravidade do módulo traseiro

## Grupos G1 e G2

O valor calculado pelo SterssLab para o peso do autocarro é diferente do da tara do veículo. Esta diferença explica-se por massa que são “conhecidas” mas não determinadas, tais como mecanismos limpa-vidros, colas, parafusos, chapas de reforço ou fixação, cabos eléctricos, perfis e revestimentos interiores entre muitos outros.

A criação destes grupos é importante, já que permite juntar grupos de elementos separando em duas partes os elementos que suportam massas não determinadas e os que conseguimos de alguma forma calcular ou estimar. A aplicação de um factor multiplicativo ao grupo que suporta toda as massas não conhecidas permite ajustar o valor da tara ao seu valor real.

<b>G1</b>	Alongamento
	Estrado
	Frente
	Painel Direito
	Painel Esquerdo
	Tejadilho
	Traseira

Tabela 11 – Grupo G1

<b>G2</b>	Almofada Traseira
	Banco do Motorista + Motorista
	Bancos
	Blindagem Motorista
	Blindagem Frente
	Chapeamento Exterior
	Chassis
	Deposito de 300L Cheio
	Ligação Estrado – Chassis
	Pavimento
	AC
	Portas Automáticas
	Pecolite
	Sanca
	Vidros

Tabela 12 – Grupo G2

### ***Elementos e Pesos***

É importante calcular e determinar o número de elementos bem como o peso correspondente a cada modelação de forma a detectar erros. Por exemplo um elemento ou elementos que pertence a vários grupos poderia introduzir erros no cálculo.

O peso é importante também para comparar os valores obtidos no StressLab com os do anteprojecto, com o peso real, caso já exista, ou com outro modelo.

As tabelas seguintes referem-se aos elementos, massas e a distribuição de massa em relação aos eixos de rodado.

### Pesos e número de elementos

StressLab	Peso (kg)	Nº Elementos
Total	9437	5280
Total individual	9438	5280
Diferença	<b>-1</b>	<b>0</b>

**Tabela 13 – variação de peso do modelo em relação ao valor real**

	Peso (kg)	Nº Elementos
Almofada Traseira	30	38
Alongamento	148	110
Ar Condicionado	220	Perfis Tejadilho
Banco do Motorista + Motorista	125	11
Bancos	340	78
Blindagem Motorista	15	31
Blindagem Frente	28	69
Chassis	5366	412
Chapeamento Exterior	128	514
Deposito de 300L cheio	277	3
Estrado	367	665
Frente	80	137
Ligação Estrado – Chassis	12	12
Painel Direito	388	385
Painel Esquerdo	413	438
Pavimento 15mm + tapete	233	638
Pavimento 18mm + tapete	141	
Pecolite	64	426
Portas Automáticas	200	8
Sanca	3	180
Tejadilho	378	534
Traseira	85	124
Vidros	397	467

**Tabela 14 – Pesos e número de elementos de cada parte do autocarro**



### ***Distribuição de Massa por Eixo***

A distribuição de massas por eixo permite verificar o modelo, comparando-o com o valor de anteprojecto. Caso esse valor seja aproximado, o modelo poderá ser considerado realista.

#### **Grupo G1**

Elementos 2331		Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
			Frente	Trás
G1	Alongamento	148	77	71
	Estrado	367	167	200
	Frente	80	-34	114
	Painel Direito	388	144	244
	Painel Esquerdo	413	167	246
	Tejadilho	378	174	204
	Traseira	85	-42	127
Total		1859	653	1206

**Tabela 15 – Massa e descarga por eixo do grupo G1**

#### **Grupo G2**

A distribuição de cargas por eixo foi calculada tendo em conta alguns subgrupos:

##### **Grupos**

	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
Chassis	5366	984	4382
Ligação Estrado – Chassis	12	13	-1
Pavimento	374	179	195
Vidros	397	230	167
Total	<b>6149</b>	<b>1176</b>	<b>4576</b>

**Tabela 16 – Massa e descarga por eixo do grupo G2**

**Revestimentos**

	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
Almofada Traseira Blindagem Motorista Blindagem Frente Chapeamento Exterior Pecolite Sanca	<b>268</b>	<b>124</b>	<b>144</b>

Tabela 17 – Massa e descarga por eixo dos revestimentos

**Bancos**

	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
Banco do Motorista e Motorista Bancos	<b>465</b>	<b>212</b>	<b>253</b>

Tabela 18 – Massa e descarga por eixo dos bancos

**Componentes**

	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
AC	220	133	87
Deposito de 300L (cheio)	477	94	383
Portas Automáticas			
<b>Total</b>	<b>697</b>	<b>227</b>	<b>470</b>

Tabela 19 – Massa e descarga por eixo de outros componentes

	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
G2	<b>7579</b>	<b>1739</b>	<b>5443</b>

Tabela 20 – Massa e descarga do grupo G2

Na tabela seguinte há que referir que nem todos os elementos do tejadilho pertencem ao grupo G1. Os perfis cuja densidade é alterada considera o peso do Ar Condicionado, pertencendo por isso ao grupo G2. A diferença está em 62 elementos e em cerca de 35kg referente aos perfis resistentes do tejadilho.

**FM**

	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)		Elementos
		Frente	Trás	
G1	1824	778	1046	2331
G2	7613	1974	5639	2949
Total G1+G2	<b>9437</b>	<b>2754</b>	<b>6683</b>	<b>5280</b>

**Tabela 21 – Massa total e descarga por eixo dos Grupos G1 e G2**

Tendo em contas este valores o Factor Multiplicativo (FM) é determinado da seguinte forma

$$FM = \frac{Tara - G2}{G1},$$

Considerando que o valor da Tara engloba o peso do Motorista (65kg).

O valor de FM determinado é 1,8268 e permite aproximar o valor de modelação pela tara real do veículo.

As descargas por eixo dos pesos dos passageiros, quer sentados quer de pé tem grande contribuição. A sua distribuição está de acordo com o Anteprojecto, no entanto há que ter atenção que a posição dos passageiros pode não corresponde na realidade pois os passageiros de pé são livres de escolher o seu lugar.

StressLab	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
Passageiros Sentados	1972	294	1678
<b>Anteprojecto</b>	$\Delta$ (%)	15	85
Passageiros Sentados	1972	293	1679
	$\Delta$ (%)	15	85

**Tabela 22 – Comparação entre da massa e descarga por eixo dos passageiros sentados de entre a modelação e o ante projecto.**

StressLab	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
Passageiros de Pé	4896	2670	2226
<b>Anteprojecto</b>	$\Delta$ (%)	55	45
Passageiros de Pé	4896	2601	2295
	$\Delta$ (%)	53	47

**Tabela 23 – Comparação entre da massa e descarga por eixo dos passageiros de pé entre a modelação e o ante projecto.**

StressLab	Massa (kg)	Descarga por Eixo (kg)	
		Frente	Trás
Peso Bruto	17813	6352	11461
	$\Delta(\%)$	36	64
<b>Anteprojecto</b>			
Peso Bruto	17813	6955	10858
	$\Delta(\%)$	39	61

**Tabela 24 – Comparação entre valores obtidos usando o software StressLab, e o valor de anteprojecto, para a massa e para a descarga por eixo.**

A variação da descarga por eixo pode ser alterada pelo peso dos passageiros, mas também pela posição de outros componentes, tal como o depósito de combustível. Foi considerado o peso do depósito com 300 litros de gasóleo bem como arbitrada a sua posição. Devido à indefinição de alguns componentes, é possível que as descargas por eixo venham a sofrer algum tipo de correcção.

Pode-se verificar uma pequena variação na distribuição de massa do modelo face ao anteprojecto, cerca de 3%, o que poderá indiciar a validação da versão inicial do modelo urbano em análise.

## 5 - Resultados

### Urbano

Os presentes resultados beneficiaram de um estudo pré existente, de A. Morais, [2] que influenciou os estudos preliminares (Cap. 3). O presente estudo está ainda dividido em duas partes, por um lado o módulo de Young calculado mais elevado e por outro o calculado por A. Morais, [2]. O que se poderá verificar é níveis de tensões ligeiramente diferentes, sendo a mais desfavorável a que utiliza o módulo mais baixo. O vidro funciona como travamento e portanto um módulo mais alto faz com que as tensões baixem. O objectivo será maximizar as tensões utilizando a situação mais desfavorável.

As tensões são calculadas considerando os esforços normais e as tensões de corte. Existem dois critérios de resistência geralmente utilizados. As tensões segundo o critério da tensão tangencial máxima são calculadas pela seguinte expressão:

$$\sigma = 2\tau_{\max} \Rightarrow \sigma = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Enquanto a fórmula simplificada ao Critério de Von Mises é:

$$\sigma = \sqrt{(\sigma)^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

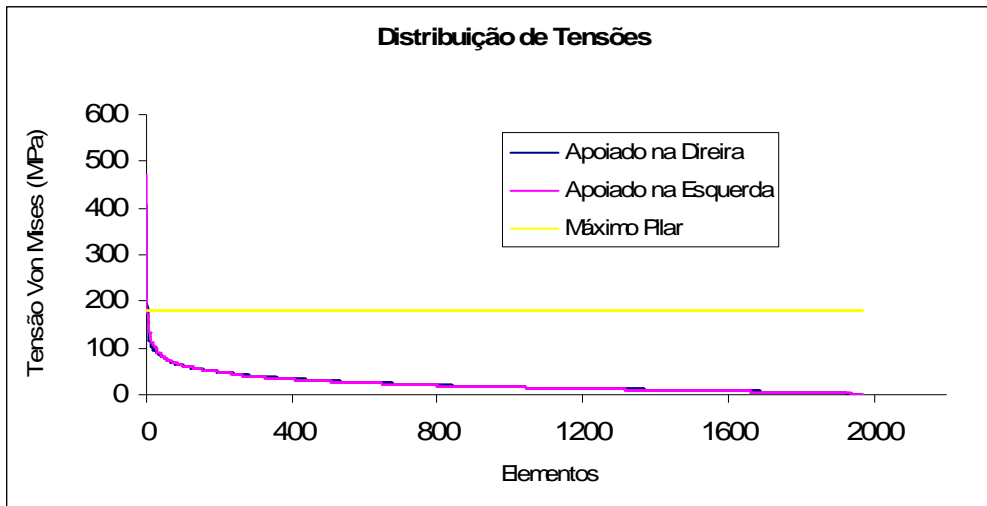
### Binómio Cola-Vidro com maior Rigidez (Módulo 1)

As tensões nos pilares para o caso em que se considerou o módulo de Young de 0,32 MPa calculado anteriormente.

Apoiado	Von Mises (MPa)	
	Direita	Esquerda
Painel Direito	109	180
Painel Esquerdo	115	115

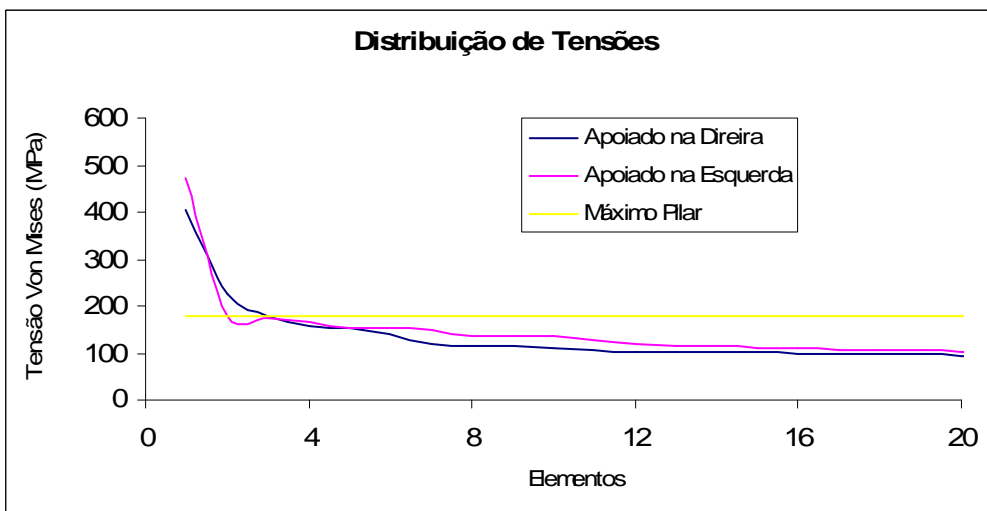
Tabela 25 -Tensões nos Pilares – Considerando o binómio de maior módulo de Young.

Podemos ver pelos seguintes gráficos os resultados para as duas situações consideradas, quando a roda é apoiada na esquerda e na direita.



**Gráfico 5 – Distribuição de Tensões – Considerando o binómio de maior módulo de Young.**

No segundo gráfico podemos verificar o baixo número de elementos com tensão acima do valor máximo dos pilares. Este gráfico é uma amplificação da distribuição dos primeiros 20 elementos.



**Gráfico 6 – Distribuição de Tensões – Considerando o Binómio de maior módulo de Young, 20 elementos mais solicitados.**

Observando os dois gráficos verifica-se a existência de poucos elementos com tensões acima do nível de tensões máximo dos pilares. A tensão máxima ocorre quando o ensaio é feito com apoio na roda da frente do lado esquerdo, mas pode-se considerar como comportamento idêntico quer quando está apoiado na esquerda quer na direita, pois as curvas tem um comportamento muito idêntico.

## Binómio Cola-Vidro com menor Rigidez (Módulo 2)

Neste caso o módulo utilizado para o binómio é de 2,4MPa, sendo os valores máximos para os pilares os seguintes:

Apoiado	Von Mises (MPa)	
	Direita	Esquerda
Painel Direito	151	187
Painel Esquerdo	154	111

Tabela 26 – Tensões nos Pilares – Considerando o binómio de menor módulo de Young.

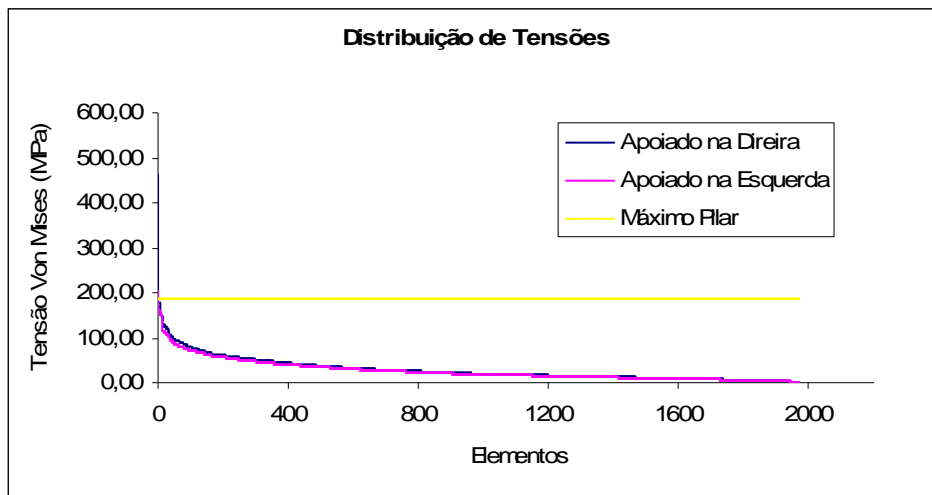


Gráfico 7 – Distribuição de Tensões – Considerando o binómio de menor módulo de Young.

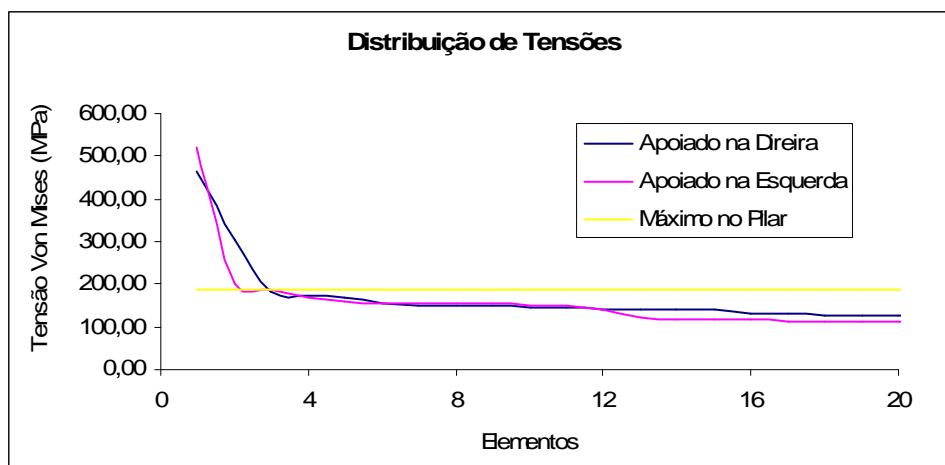


Gráfico 8 – Distribuição de Tensões – Considerando o binómio de menor módulo de Young, 20 elementos mais solicitados.

Neste caso, em que o módulo de Young para o vidro é mais baixo, a tensão máxima sobe em relação ao caso anterior, mas o comportamento das tensões é idêntico, mantendo-se o comportamento similar quer apoiado na direita quer na esquerda.

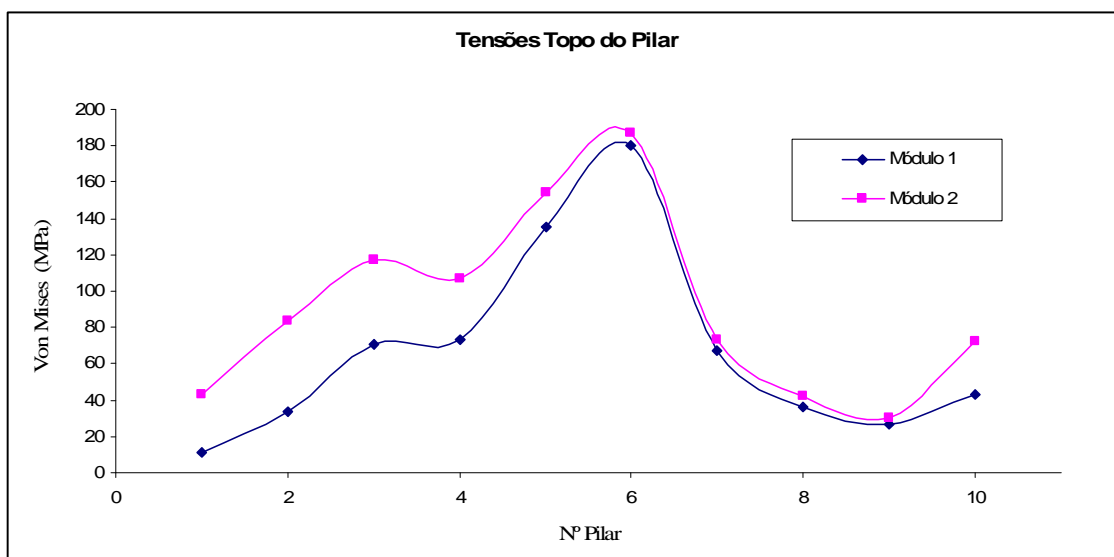
### Nível de Tensões nos Pilares, Módulo 1 e Módulo 2

O valor das tensões máximas ocorre no pilar 6D, ou seja no segundo pilar da porta de traz a contar da frente do autocarro.

	Von Mises (MPa)	
	Direita	Esquerda
Módulo 1	115	180
Modulo 2	154	187
$\Delta$ (%)	34	4

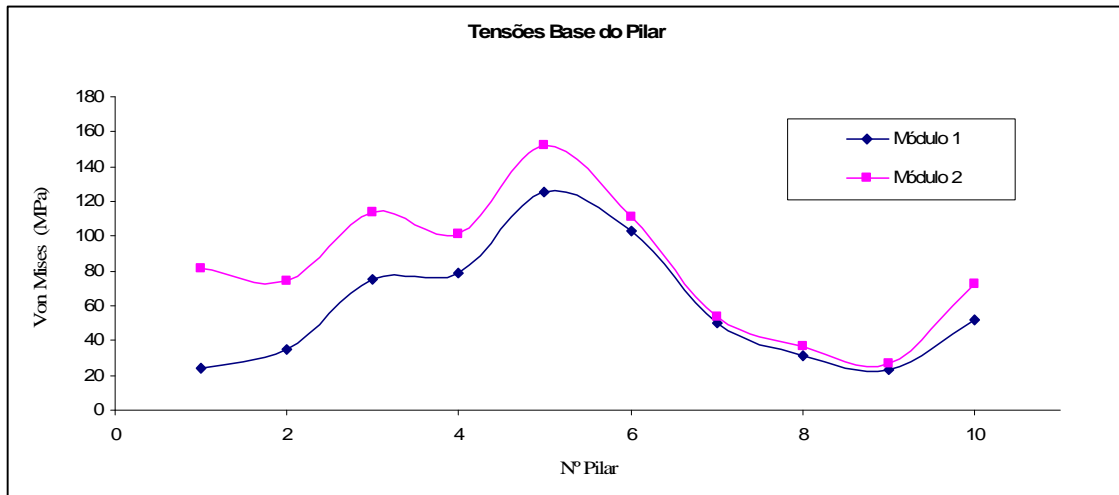
**Tabela 27 – Comparação das tensões máximas nos pilares para caso de solicitação, apoiado na direita e esquerda, tendo em conta os dois módulos utilizados.**

A tabela que se segue refere-se à situação mais desfavorável, isto é quando o autocarro está apoiado na roda esquerda, sendo que as maiores tensões estão no painel direito. Um pilar é composto no mínimo por um elemento, mas deverá ter pelo menos dois pois reproduz melhores resultados de cálculo. A contagem dos pilares é feita a partir da frente do autocarro, sendo que o primeiro pilar pertence ao conjunto da frente e o ultimo à traseira.



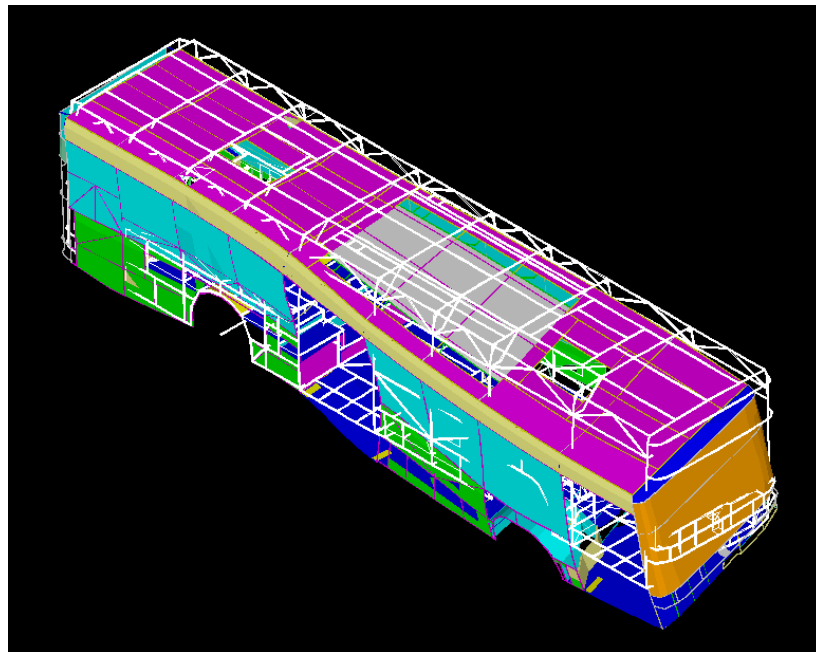
**Gráfico 9 – Comparação das tensões no topo dos pilares do lado direito, para caso de solicitação mais desfavorável, tendo em conta os dois módulos utilizados.**





**Gráfico 10 – Comparação das tensões na base dos pilares do lado direito, para caso de solicitação mais desfavorável, tendo em conta os dois módulos utilizados.**

O que se retira dos gráficos anteriores é que apesar das tensões máximas estarem próximas, a influência do vidro é diferente nos dois casos. As maiores deslocamentos dão-se na frente devido à ausência de apoio e portanto assim se explica esta diferença de tensões.



**Figura 66 – Urbano, deslocamentos quando apoiado na esquerda.**

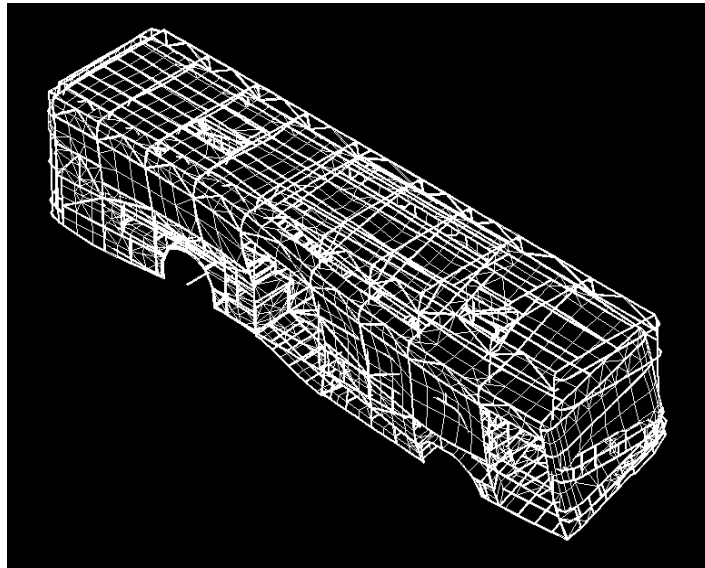


Figura 67 – Urbano, modelo de linhas, deslocamentos quando apoiado na esquerda.

### Comparação do nível de tensões dos Módulos 1 e Módulo 2

Nos gráficos seguintes pode comparar as distribuições de tensões quando se utilizam dois módulos de Young diferentes para o vidro.

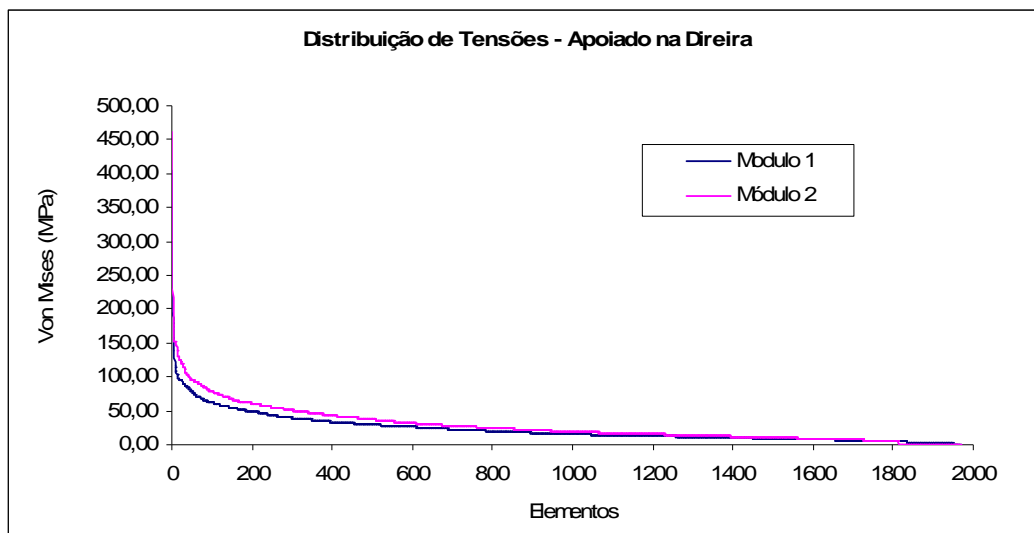
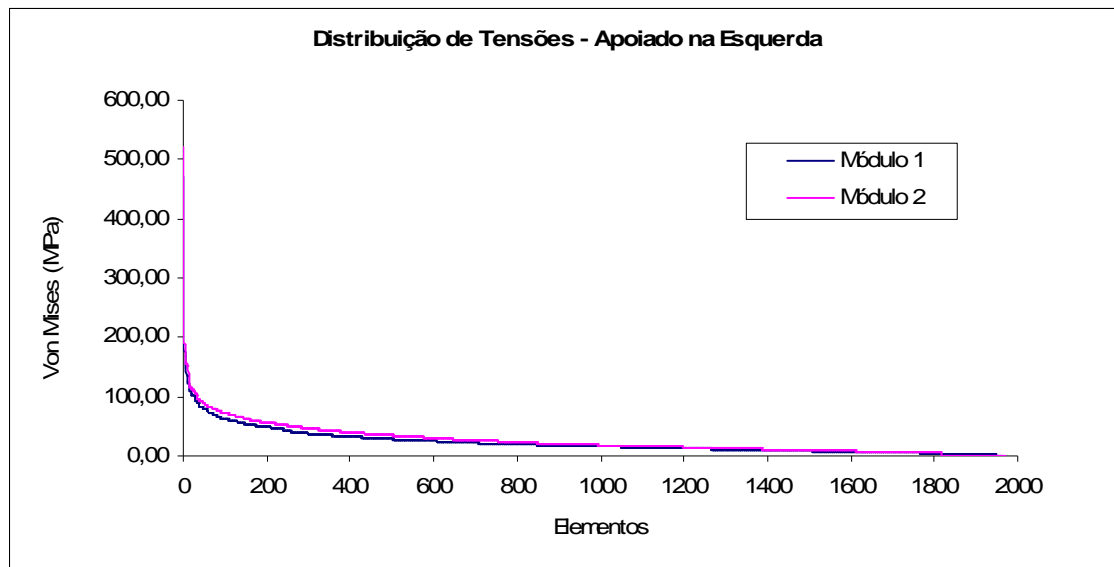


Gráfico 11 – Comparação das tensões, considerando os módulos de Young Diferentes, ensaio apoiado na roda esquerda



**Gráfico 12 – Comparação das tensões, considerando os módulos de Young diferentes, ensaio apoiado na roda direita.**

As curvas de distribuição de tensões são parecidas nos dois casos, tendo comportamentos idênticos quando apoiado à esquerda ou à direita. As curvas do módulo mais baixo são ligeiramente superiores nos elementos de maior tensão. A maior rigidez confere aos pilares maior travamento fazendo com que se deformem menos, logo tensões mais baixas nos pilares. A ligeira diferença parece ser ligeiramente menor quando apoiado na esquerda. As zonas das portas poderão ser a razão para essa explicação, pois possui perfis mais longos, logo menos travados.

## Modelo Carris

O trabalho de A. Morais, [1], teve uma grande importância neste trabalho, pois permitiu auxiliar o projecto, como vimos anteriormente.

É importante comparar os níveis de tensões nos pilares para o caso do autocarro da Carris, [2], e o Carris modificado (Ensaio3) para o conjunto de pilares que se escolheu.

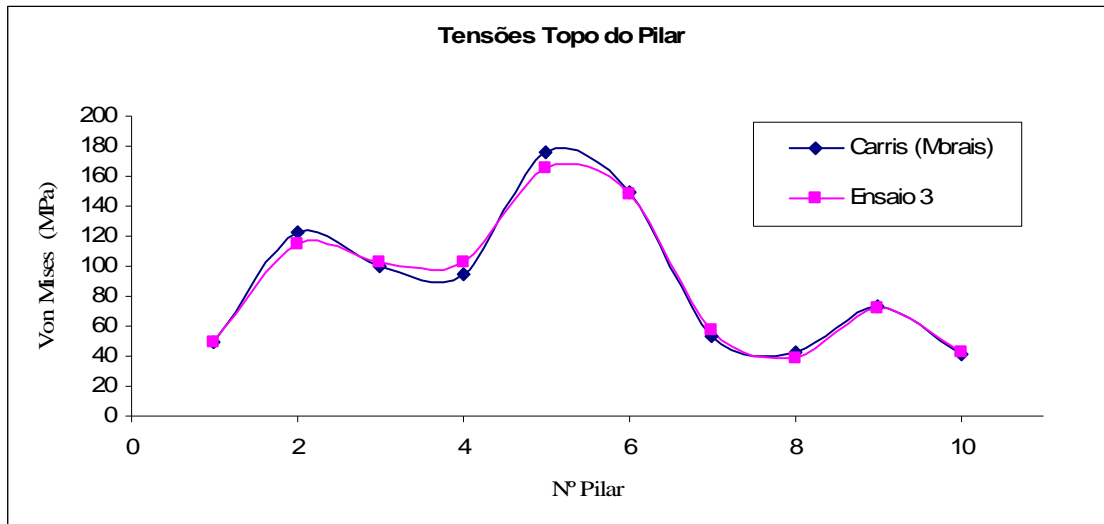


Gráfico 13 – Comparação entre as tensões no topo dos pilares, Modelo da Carris e o Ensaio 3.

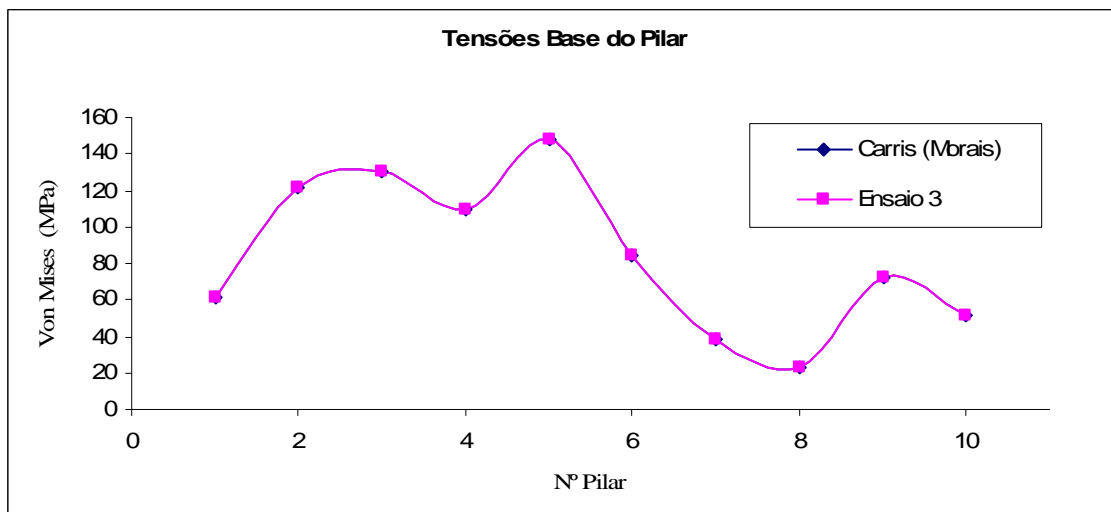
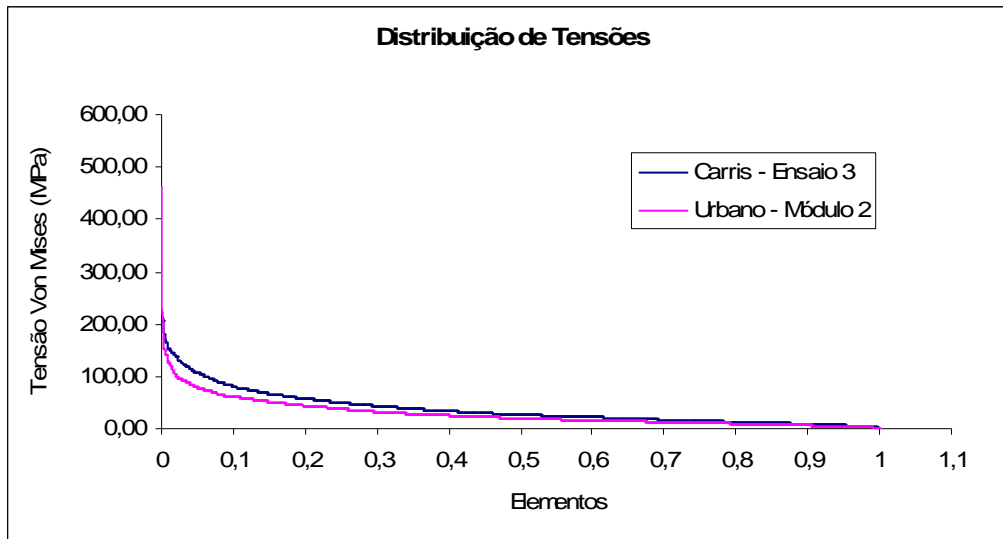


Gráfico 14 – Comparação entre as tensões na base dos pilares, modelo da Carris (Morais) e o Carris (Ensaio 3).

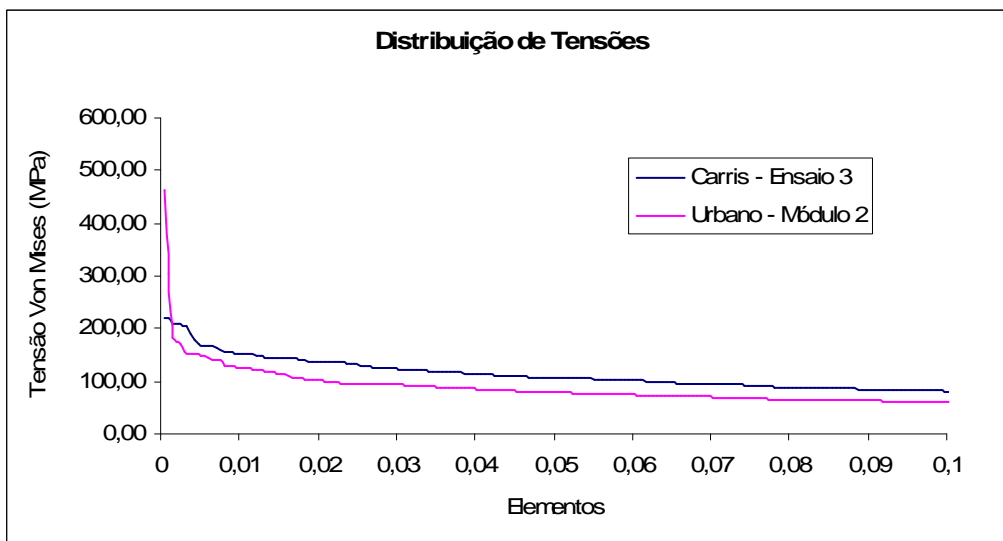
Os resultados de tensões nos pilares para os modelos da Carris, nos estudos preliminares, evidenciam um valor de tensões máximos nos pilares mais baixo. Podemos verificar que no topo dos pilares a diferença se acentua ligeiramente, o modelo inicial Carris possui tensões superiores máximas no pilar mas também no estrado, motivo pelo qual foi escolhido o conjunto de pilares do Ensaio 3 (Capítulo 3).

### **Comparação entre os níveis de tensão entre o Urbano (Módulo 2) e da Carris (Ensaio3).**

Os gráficos seguintes comparam a distribuição de tensões entre o Modelo (Módulo 2) e da Carris (Ensaio 3) considerando os dois apoios, à direita e à esquerda.



**Gráfico 15 – Distribuição de tensões, quando apoiado na direita**



**Gráfico 16 – Distribuição de tensões, quando apoiado na direita, ampliação da zona inicial**

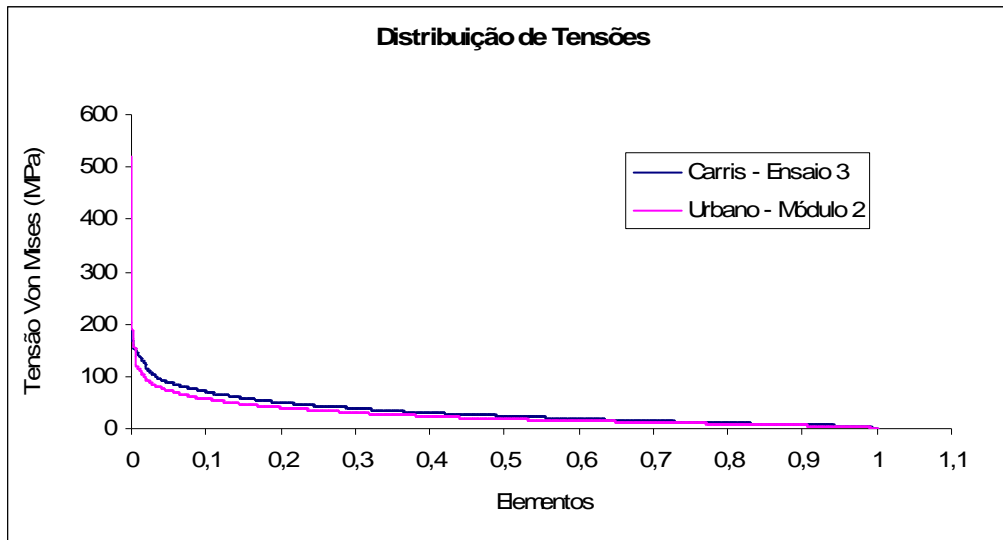


Gráfico 17 – Distribuição de tensões, quando apoiado na esquerda

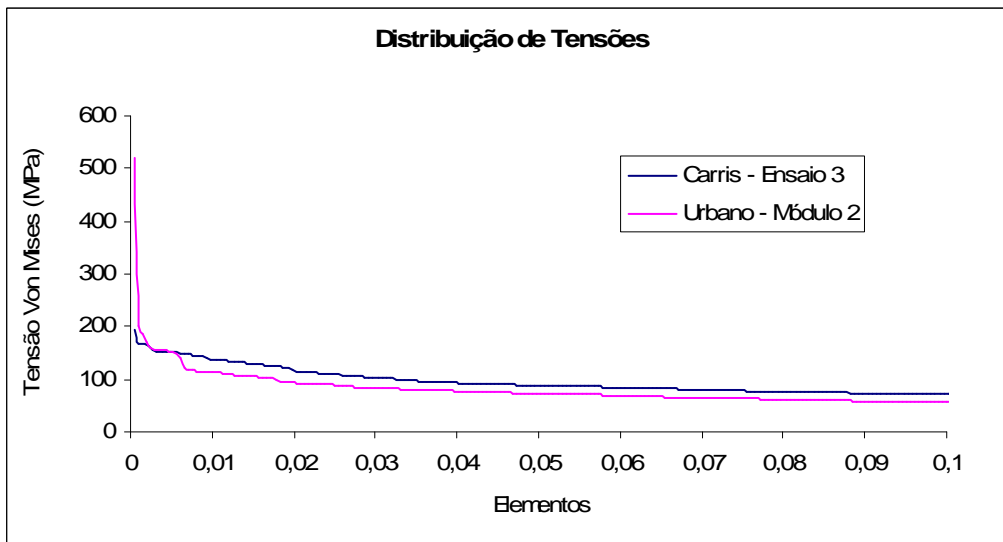


Gráfico 18 – Distribuição de tensões, quando apoiado na esquerda, ampliação da zona inicial

Podemos verificar que geralmente as tensões no Urbano (Módulo 2) são inferiores aos do da Carris excepto na parte inicial. O nível de tensões para os pilares do Urbano (Módulo 2) é de 187MPa enquanto no caso Carris (Ensaio 3) é cerca de 168MPa, no entanto na generalidade o nível de tensões é mais baixo no modelo Urbano que no da Carris. A possibilidade de existirem elementos mal dimensionados explica a diferença entre as tensões máximas.

## Acções de Melhoria

Pela observação dos gráficos existem elementos com valores de tensão acima do valor de tensão dos pilares para o modelo Urbano. Os elementos que estão acima do considerado pior dos pilares, 187MPa (Tabela 28) foram identificados e estão na seguinte tabela.

Elemento	Tensão (MPa)
2082	521,10
1467	461,83

Tabela 28 – Elementos cuja tensão é superior à da pior tensão nos pilares

### Acção 1 – Elementos do degrau

Os elementos identificados pertencem ao degrau de acesso do pavimento inferior ao pavimento na zona da traseira do autocarro. As tensões elevadas devem-se ao facto do elemento ter baixa inércia a torção pois os esforços envolvidos são extremamente baixos sendo, foram por isso substituído por perfis 40x20x2mm.

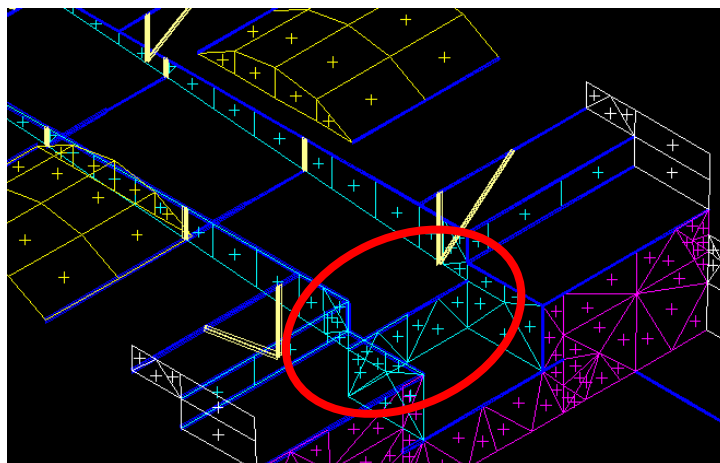


Figura 68 – Perfil do degrau/pavimento

## Acção 2 – Ligações entre o estrado e o chassis

Modificação de dos apoios por questões construtivas. Os perfis quadrados inicialmente utilizados, formam substituídos por elementos rectangulares, com o objectivo de permitir uma melhor ligação de soldadura com os elementos do estrado.

## Resultados do nível de tensões

Após as acções de correcção a distribuição de tensões foi calculada, por forma a determinar os novos gráficos de distribuição de tensões.

Apoiado	Von Mises (MPa)	
	Direita	Esquerda
Painel Direito	151	187
Painel Esquerdo	154	154

Tabela 29 – Tensões máximas nos pilares, após acções de correcção.

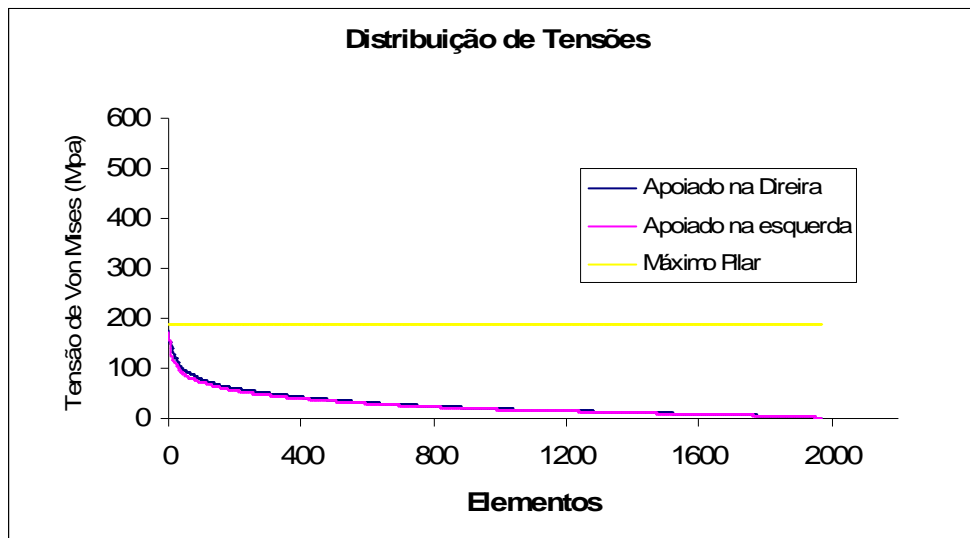


Gráfico 19 – Distribuição de tensões (Módulo 2), após correcção.



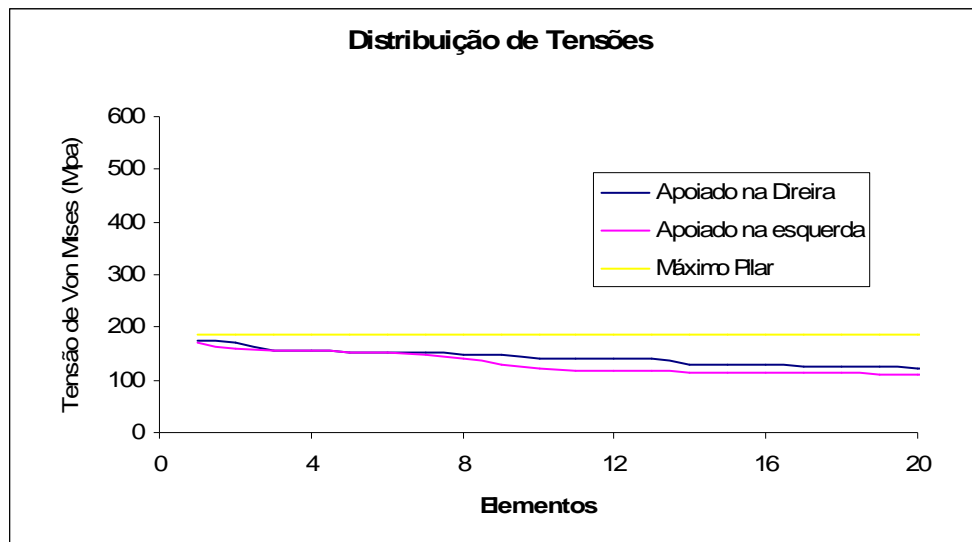


Gráfico 20 – Distribuição de tensões (Módulo 2), após correcção, primeiros 20 elementos.

Após as acções de melhoramento, verifica-se pelo gráfico que o nível de tensões passa a ter como máximo o valor das tensões dos pilares que havia sido calculado anteriormente. A alteração do perfil, não teve qualquer influência, os valores das tensões máximas dos pilares. As características do perfil não eram tanto do carácter estrutural mas sim de arremate final.

## Situação Possível – Excesso de Passageiros

Uma das situações possíveis de ocorrer é o excesso de passageiros. O excesso de passageiros é, juntamente com percursos muito irregulares, são um dos graves causadores de danos nos autocarros urbanos.

*“...movimento de Utentes, em comunicado. O mesmo documento critica os horários, a "bilhética confusa", o facto de haver paragens sem abrigos e mal colocadas, assim como a sobrelotação constante dos autocarros...”*

In Jornal de Notícias, Comissão de Utentes em reunião com STCP, em 8 de Novembro de 2007

Assim sendo o estudo engloba o aumento de passageiros de pé já que a lotação de pessoas sentadas é a mesma. A possibilidade de introduzir o factor multiplicativo para um carregamento no StressLab facilita esta análise. O aumento de passageiros, foi calculado em 20, 30, 50 e 75%.

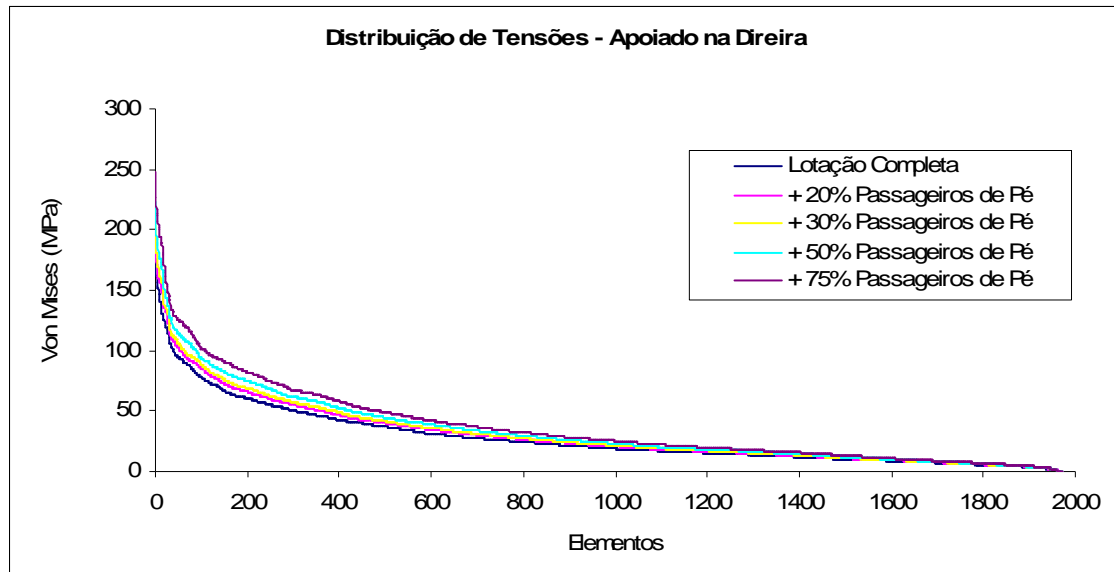


Gráfico 21 – Distribuição de Tensões, excesso de passageiros de pé, apoiado na roda direita.

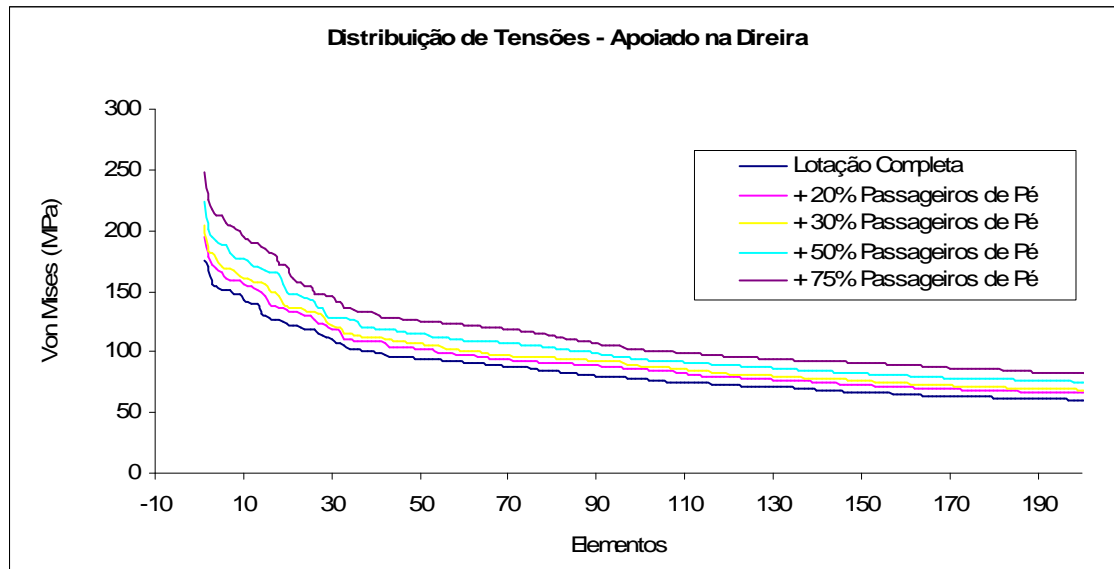


Gráfico 22 – Ampliação do gráfico da distribuição de Tensões, excesso de passageiros de pé, apoiado na roda direita.

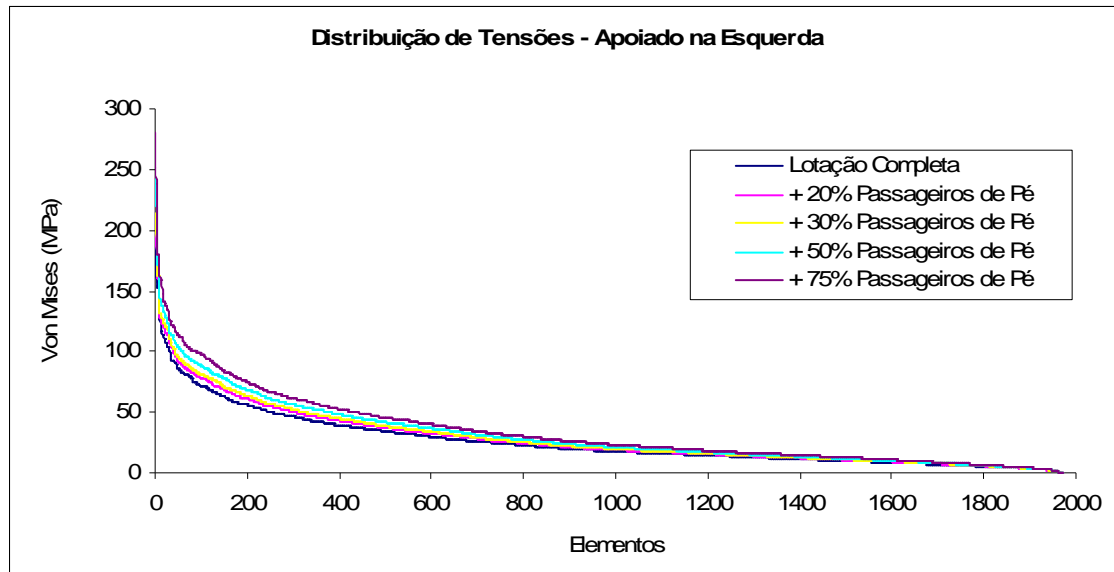


Gráfico 23 – Distribuição de tensões, excesso de passageiros de pé, apoiado na roda esquerda.

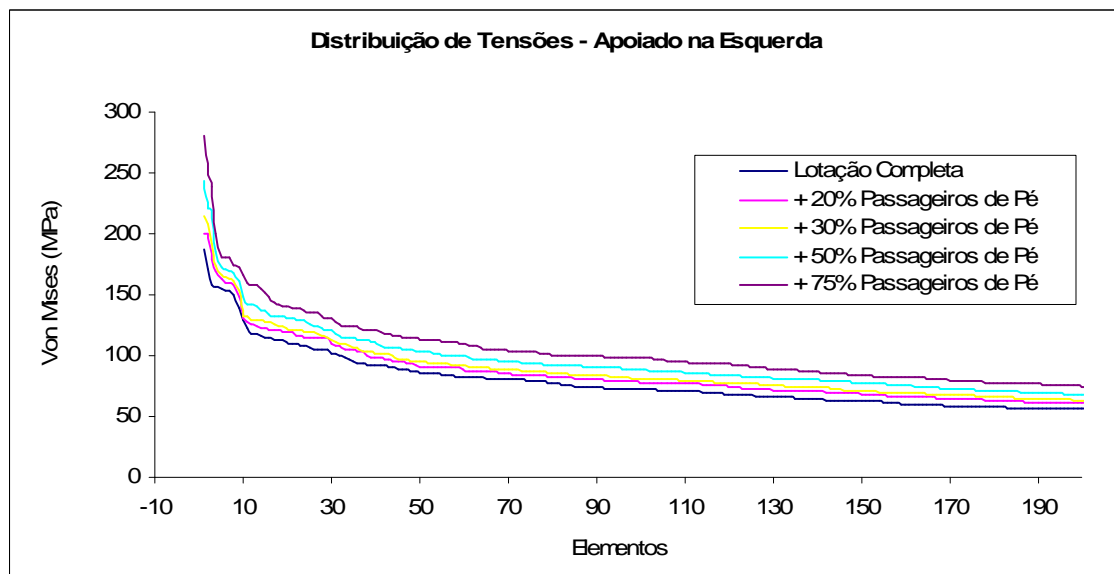


Gráfico 24 – Ampliação do gráfico da distribuição de tensões, excesso de passageiros de pé, apoiado na roda esquerda.

A distribuição de tensões revela um aumento de tensões máximas e também a nível dos pilares no Urbano, quando se aumenta o número de passageiros de pé no autocarro. O aumento de passageiros provoca um maior estado de tensão na estrutura num grande número de elementos.

A tabela e gráficos seguintes comparam os valores dos pilares e máximos com os iniciais, em que a lotação estava completa mas sem sobrecarga.

		Tensão (MPa)			
		Máximo no Pilar	$\Delta(\%)$	Máximo	$\Delta(\%)$
1	Lotação Completa	187	0,0	187	0,0
2	+20% P. de Pé	201	7,5	201	7,3
3	+30% P. de Pé	208	11,3	214	14,7
4	+50% P. de Pé	221	18,2	244	30,4
5	+75% P. de Pé	239	27,8	281	50,1

Tabela 30 – Máximos para o Urbano considerando excesso de Passageiros de pé

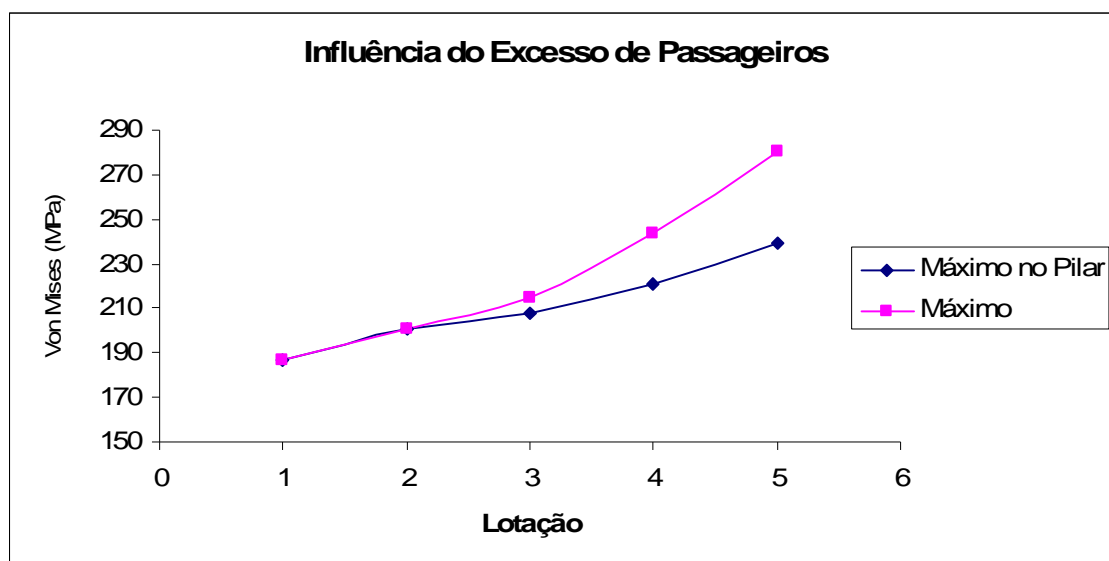


Gráfico 25 – Máximos para o Urbano considerando excesso de Passageiros de pé

As tensões aumentam com ao aumento da sobrecarga, de forma linear para os pilares mas de forma exponencial para o máximo no Urbano. Podemos ainda verificar na Tabela 30 a percentagem do aumento de tensões, que no caso mais desfavorável chega aos 50% para a tensão máxima.

## Discussão de Resultados

O auxílio ao projecto é um dos pontos-chave no desenvolvimento ou melhoramento de produtos. Os primeiros estudos permitiram “ajudar” na escolha de perfis que mais tarde iram ser utilizados no novo modelo Urbano.

As situações estudadas estão limitadas pelas capacidades do software, sendo que na análise não são considerados os regime elasto-pástico ou a fadiga. As condições fronteira são aquelas que correspondem à situação de repouso, com velocidade nula, transformando a suspensão em elementos rígidos e que simulam uma situação real e que são possíveis modelar nesta aplicação.

O tratamento de dados baseia-se em muitas manipulações de Excel, quer quando descuidadas podem provocar erros significativos. Uma das vantagens deste tipo de análise com elementos de viga, dois nós com 6 graus de liberdade, é permitir diminuir o número de equações diferenciais reduzindo assim o tempo de cálculo, por outro lado os resultado não são tão aproximados como na formulação de elementos tipo sólido. O tempo de cálculo é relativamente baixo, dependendo do tipo de elementos. No caso do Urbano com 5280 elementos demora menos de um minuto a efectuar o cálculo, enquanto um de 3340 elementos demora menos de 30 segundos. A modificação de pequenos elementos é fácil, no entanto a folha de cálculo poderá ter que sofrer alterações caso sejam adicionados novos elementos, tornando-se uma desvantagem.

Os estudos preliminares revelam-se importantes na análise devido ao seu carácter de preparação. As soluções daí resultantes permitiram escolher o novo conjunto de perfis a utilizar para os pilares e estrada, no entanto é possível que os resultados estejam passíveis de “algum erro”, já que o método de manipulação de resultados foi melhorado com o tempo.

No caso do estudo dos pilares, é importante referir a importância das tensões não só a nível dos pilares mas também a nível de estrada, ou mesmo a tensão máxima. O ideal para a distribuição do nível de tensões seria uma variação de tensões mais suave no início do gráfico da distribuição de tensões. Essa possibilidade poderá ser difícil de alcançar, pois se mudar radicalmente alguns perfis resistentes, o comportamento das tensões será diferente.

Relativamente a ligações entre perfis pode-se verificar no estudo da ligação estrada pilar pode introduzir esforços consideráveis, sendo que muitas das ligações existentes não convergem para um mesmo nó, em termos de linhas de eixo neutro ou os perfis são de diferentes secções, originando má transmissão de esforços, e pontos de concentração de tensões que poderão originar fracturas. A simplificação deste tipo de estrutura é também um factor de erro para modelação.

A distribuição de massas é importante por provocar esforços, devido quer a sua massa quer a sua posição. A modelação correcta destes elementos aproximará o modelo do real. Quanto mais real for esta modelação menor vai ser o factor multiplicativo a introduzir na estrutura resistente pois o peso da estrutura será mais próximo da tara do veículo, isto porque há elementos que não conseguimos modelar, tais como cabos eléctricos, componentes estéticos ou fibras de revestimento. Quando não se sabe

exactamente o peso dos componentes, foi arbitrado um valor estimado, de forma a poder ser contabilizado na posição correcta.

Não se sabe a relação entre o valor real das tensões e o valor teórico calculado mas que se sabe serem valores diferentes. Isto explica-se pelas simplificações necessárias na modelação, sendo que a estrutura real é muito mais travada que o modelo devido a pequenas chapas de reforço, colas, alguns revestimentos, varões no interior, influência da estrutura dos bancos (que podem variar) entre muitos outros.

O estudo que permitiria encontrar uma relação quantitativa e qualitativa entre os valores reais e os teóricos não revelou resultados satisfatórios. Os resultados de extensometria revelara-se inconsistentes entre as várias medições efectuadas, sendo que as causas poderão ser má escolha do ponto de medição, baixas tensões no local de medição que conduziriam a fenómenos de ruído ambiental, ou outras causas referidas anteriormente no Cap. 4 relativo à extensometria. As baixas tensões podem ainda ser explicadas devido ao estado ainda não acabado, com algumas modificações em termos de pesos originando tensões ainda mais baixas.

Inicialmente por questões de tempo apenas foram colocadas duas rosetas, com o objectivo de medir esforços normais, de corte de tracção ou compressão provocados por momentos flectores, ou de corte. A dificuldade de disponibilidade do modelo em questão bem como a falta de tempo para novas medições levaram a que novas medições não fossem efectuadas. No entanto fica em aberto a possibilidade de outras medições em modelos diferentes, escolhendo um ponto onde as tensões sejam maiores, como é o caso dos pilares, na zona dos vidros, visto só ser necessário retirar os revestimentos interiores na zona escolhida.

A questão abordada em relação aos vidros pretende estudar a variação do módulo de Young do binómio cola-vidro tratando-o como se fosse meia placa encastrada em fundação elástica sujeita à tracção no seu plano. Os resultados revelam que o módulo de Young diminui com a espessura do vidro. Explica-se devido ao facto de com espessura maior a sua rigidez aumenta fazendo com que haja menor deformação por parte do vidro, o deslocamento aumenta devido ao aumento do deslocamento da cola.

Na validação do modelo, uma das verificações necessárias é a correcta modelação do chassis comparando-a com a informação fornecida pelo fabricante. A posição do centro de massa de cada um dos módulos bem como a descarga por eixo do seu peso são garantidas com erros quase nulos. A única cota não respeitada para o módulo traseiro, refere-se à posição do centro de gravidade em altura. Esta cota é de difícil correcção devido ao centro de massa do motor estar localizado ao nível dos apoios, o que não corresponde à realidade, caso contrario esta diferença seria muito menor.

Os resultados de comparação para o modelo Urbano em estudo entre a utilização do módulo de Young para o binómio cola-vidro calculado e o utilizado por A. Morais, [2]. O nível de tensões a nível dos pilares é geralmente inferior no caso do módulo calculado e esta diferença acentua-se no caso de pior distribuição de tensões, sendo essa diferença ampliada para os pilares desde da porta de trás até à frente. Explica-se devido ao aumento da rigidez local evitando que os pilares se desloquem tanto relativamente

uns aos outros. A diferença aumenta para o ensaio apoiado na roda esquerda e para o segundo pilar da porta traseira a contar da frente. Esta razão é devida a perfis mais longos (pilares) e menos travados no plano dos arcos do autocarro.

Comparando o modelo de estudo com o Ensaio 3 da Carris, nota-se um nível de tensões mais baixo em toda a generalidade para o Urbano, quer quando apoiado na esquerda ou na direita. O número de elementos com tensões superiores ao nível máximo de tensões é também menor quando comparado com o modelo da Carris (Ensaio 3).

As acções de melhoramento englobam as tensões acima do valor dos pilares, pois os registos históricos indicam não ter havido muitos problemas com os pilares. No caso as acções de melhoria referem apenas a um elemento de carácter de remate então construtivo. Após substituição desse perfil as tensões máximas decaíram sem grande alteração dos níveis de tensões quer a níveis dos pilares quer em termos de distribuição.

Isto indica uma boa aposta na escolha dos perfis, podendo mesmo aceitar o estudo prévio como válido. A existência de modelos permite assim preparar um novo projecto aumentando as capacidades de análise com modelos idênticos. Permite ainda tirar conclusões em termos de modelação comparando modelos mais ou menos completos em termos de componentes pelo uso do factor multiplicativo. É uma mais valia em termos de know-how para a empresa mas também em termos profissionais.

A sobrecarga devido ao excesso de passageiros pode ocorrer muitas vezes durante a vida útil de um autocarro. Esse excesso provoca aumento de tensões que ampliadas por fenómenos de fadiga e vibrações provocam danos de grande dimensão muitas vezes com custos de reparação avultados. Se verificássemos que as tensões calculadas correspondem ao real, então no caso de existir um excesso de passageiros de pé admitido em 70%, os valores subiriam acima do limite elástico do material provocando deformação permanente. No caso não só apenas haveria deformação plástica mas provavelmente também ocorreria iniciação de fendas de fadiga em pontos de concentrações de tensões.

Embora a modelação tenha o mais cuidada possível, não está totalmente isenta de erros, quer de modelação, que por simplificação de características físicas dos perfis em questão (utilização de formulas aproximadas, [8]), posição exacta dos nós do modelo comparativamente com os reais por ser impossível.

Pode-se considerar esta modelação como uma versão válida de um estudo para um projecto em curso, pois foram considerados muitos dos componentes relevantes para a modelação e atingidos resultados não muito diferentes dos obtidos por A. Morais, [2]. Devido ao “timing” de projecto algumas estruturas foram modeladas de forma a poder executar o cálculo. Por esta razão, esta versão é possível de sofrer evoluções mas este trabalho serviu como base de estudo e antecipação a um novo modelo projectado pela CaetanoBus.





## **6 - Conclusões**

O trabalho realizado abordou questões relativas ao projecto de um autocarro. Ao contrário de estudos realizados anteriormente, serviu para preparar uma versão de um novo modelo de autocarro projectado pela CaetanoBus. Este estudo permitiu comparar diferentes soluções de perfis aplicados aos pilares mas também comparar um modelo antigo com um modelo em projecto e novas situações, designadamente o excesso de passageiros.

Um projecto sofre várias evoluções sendo que esta é a primeira que servirá de base a novos estudos quer neste modelo quer para comparação com novos modelos urbanos da CaetanoBus.

Poderá ter contribuído para a evolução de novos trabalhos na empresa, deixando um registo de trabalho em Modelos e Relatório.

Permitiu também aumentar o conhecimento em termos de know-how para a empresa, com a abordagem de alguns temas já estudados mas passível de serem melhorados, como é o caso dos vidros.

Contribuiu para a formação do aluno em fase de Estágio Curricular, contribuindo para um bom relacionamento entre Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a Empresa CaetanoBus.



## **Referências Bibliográficas**

- [1] – ECE 66 – Regulamento para estruturas de veículos de transporte de passageiros
- [2] - Optimização do Projecto da estrutura de autocarros com software de “Computer Editing Engineering”, António Domingos Araújo Morais, 2004
- [3] - <http://www.nctr.usf.edu/jpt/pdf/JPT%208-4S%20Morka.pdf>
- [4] - [http://www.simpack.com/downloads/pdf/um03-alstom\\_peppel.pdf](http://www.simpack.com/downloads/pdf/um03-alstom_peppel.pdf)
- [5] - <http://www.md.kth.se/~ulfs/Conferences/Nafems2ndNordicSeminar2006/Scania/Nafems2006NordicSeminarScania.pdf>
- [6] - [http://www.technet-alliance.com/uploads/tx\\_caeworld/Seite\\_32-33\\_Dyna\\_Bus\\_Rollover\\_aus\\_IP\\_1-05.pdf](http://www.technet-alliance.com/uploads/tx_caeworld/Seite_32-33_Dyna_Bus_Rollover_aus_IP_1-05.pdf)
- [7] - [http://www.idac.co.uk/consulting/casestudies/capoco/cs\\_capoco.htm](http://www.idac.co.uk/consulting/casestudies/capoco/cs_capoco.htm)
- [8] - Tabelas de perfis normalizados: Profil Arbed

## **Bibliografia**

Análise por MEF de uma Estrutura Metálica de um Autocarro de Turismo de Três Eixos, Tiago Lopes, FEUP, 2006/2007

Tabelas de perfis normalizados: Profil Arbed

Tabelas Técnicas, J. S. Brazão Farinha, A. Correia dos Reis, Edições P.O.B., Setúbal, 1993

Mecânica das estruturas (parte 1), Carlos Reis Gomes, DEMEGI-FEUP

Mecânica dos Sólidos e Resistência dos Materiais, J.F. Silva Gomes, Edições INEGI, Porto, 2004

Optimização do Projecto da Estrutura de Autocarros com Software de “Computer Editing Engineering”, António Domingos Araújo Morais, FEUP, 2004

Projecto Fim de Curso, André Ramos, FEUP, 2006/2007



## **Anexos**

### ***O Trabalho de alguns recentes alunos finalistas da FEUP na DGE, (ENG)***

Em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto a CaetanoBus tem acolhido alunos para realizar trabalhos de fim de curso.

É de extremo interesse o trabalho de diferentes alunos, pois permite a criação de uma base de dados extremamente importante que permitirá no presente melhorar o produto e evitar erros no futuro. Por esta razão o contributo dos estagiários é de grande interesse quer no aspecto de formação enquanto aprendizes quer para crescimento e valorização do know-how da empresa.

Seguidamente é feita uma pequena reflexão sobre o trabalho de alguns estagiários que passaram pela CaetanoBus nos últimos anos.

Os estudos sobre a estrutura resistente são efectuados em todos os casos por elementos finitos utilizando o Software StressLab existente no DGE da CaetanoBus.

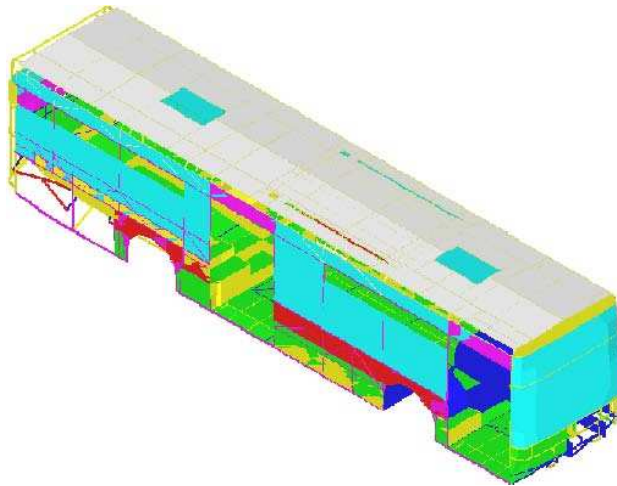


**António Morais (2003-2004)**

António Morais foi o pioneiro no domínio desta ferramenta. Permitiu assim que os trabalhos seguintes tivessem uma linha de melhoramento com base no trabalho desenvolvido. Foi ele que iniciou o estudo em Excel permitindo uma análise de dados mais fácil e conduzindo ao aperfeiçoamento desse método por parte de outros alunos que se seguiram.

Cálculou por elementos finitos a estrutura resistente de um autocarro urbano cujas características são idênticas ao modelo por mim também modelado. Devido ao seu trabalho, pude efectuar um estudo de análise para escolher o melhor conjunto de pilaras como veremos mais adiante.

Permitiu também tirar algumas ilações acerca do método de análise de forma a tentar melhorar um produto que se quer competitivo.



Calculou a Inércia Torsional bem como ao Módulo de Resistência a Torção através das expressões aconselhadas pelo autor Roark (Roark's Formulas for Stress and Strain):

$$I_t = \frac{1}{3} U t^3$$

$$W_t = \frac{U^2 t^2}{3U + 1,8t}$$

$I_t$  – Momento de Inércia Torsional

$W_t$  – Módulo de Corte Torsional

$U$  – Comprimento da linha média (meio do perfil)

$t$  – Espessura do perfil

Apesar de não ter garantido a posição do centro de gravidade do chassis permitiu elucidar-nos acerca dessa mesma questão. Na verdade é extremamente importante pois o cálculo depende e muito da posição dessa massas. A verdade é que o chassis geralmente não tem uma descrição de componentes muito detalhada sendo muitas vezes necessário caracterizar fisicamente os perfis resistentes do chassis conduzindo a suposições acerca de pesos de determinados componentes. O peso de componentes de suspensão, direcção, motor e caixa, diferencial, semi-eixos elementos de direcção entre outros efectua-se a uma pesagem directa, caso difícil se o chassis ainda não estiver disponível, ou é baseada em componentes similares. Alguns componentes são introduzidos através da manipulação da densidade do perfil no local do componente de forma a somar ao seu peso o do componente.

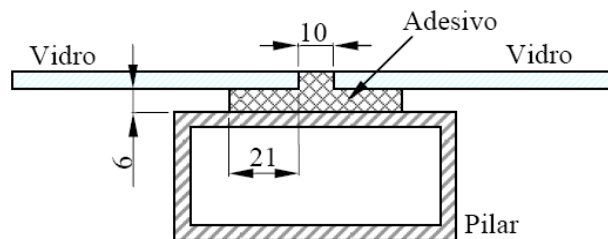


A influência do comportamento da suspensão foi um dos temas estudados. É uma das considerações mais importantes e sem ela a análise seria mais complexa, quando na verdade é necessário simplificar.

*“A suspensão é o sistema flexível que suporta, sobre a ponte de eixos (bloco mecânico apoiado sobre o solo, que inclui os eixos e as rodas), o corpo rígido principal do autocarro (que engloba o habitáculo dos passageiros). Tem como principal função garantir uma boa distribuição do peso da viatura por todos os rodados. Durante a movimentação proporciona também estabilidade dinâmica e conforto para os ocupantes.”, [1] Pág. 25.*

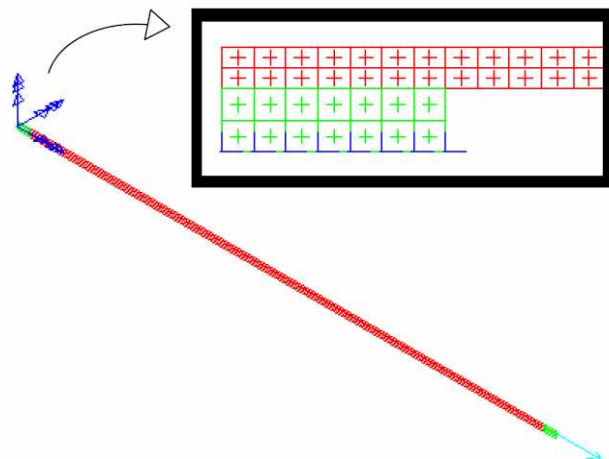
Considera que o estudo estático, velocidade nula, é suficiente para determinar esforços de cargas desfavoráveis, os sacos pneumáticos comportam-se como elementos rígidos devido a eliminação da componente da velocidade. Considera ainda que as molas se tornam rígidas e que por isso toda a carga é transferida para o corpo.

Fez ainda um significativo estudo acerca do comportamento físico dos vidros modelados como elementos do tipo shell, calculando o módulo de Young equivalente para posterior introdução no StressLab.



Considerou um elemento cola-vidro de área constante (vidro) onde aplicou uma força conhecida. Esta relação foi calculada para um comprimento médio dos vidros.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta F}{A}}{\frac{\Delta l}{l}} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$



Na verdade o módulo de Young depende do comprimento dos vidros mas também da quantidade de adesivo.

Pelos cálculos obtidos o valor do módulo de Young aproxima-se do valor do módulo do adesivo. Se pensarmos se o vidro se tornar infinitamente espesso comparado com a espessura do adesivo, a rigidez do vidro torna-se influente levando apenas á deformação do adesivo explicando assim o valor do módulo.

Fez ainda uma análise das possíveis situações a que um autocarro está sujeito, durante a sua vida útil, [1] pág. 25.

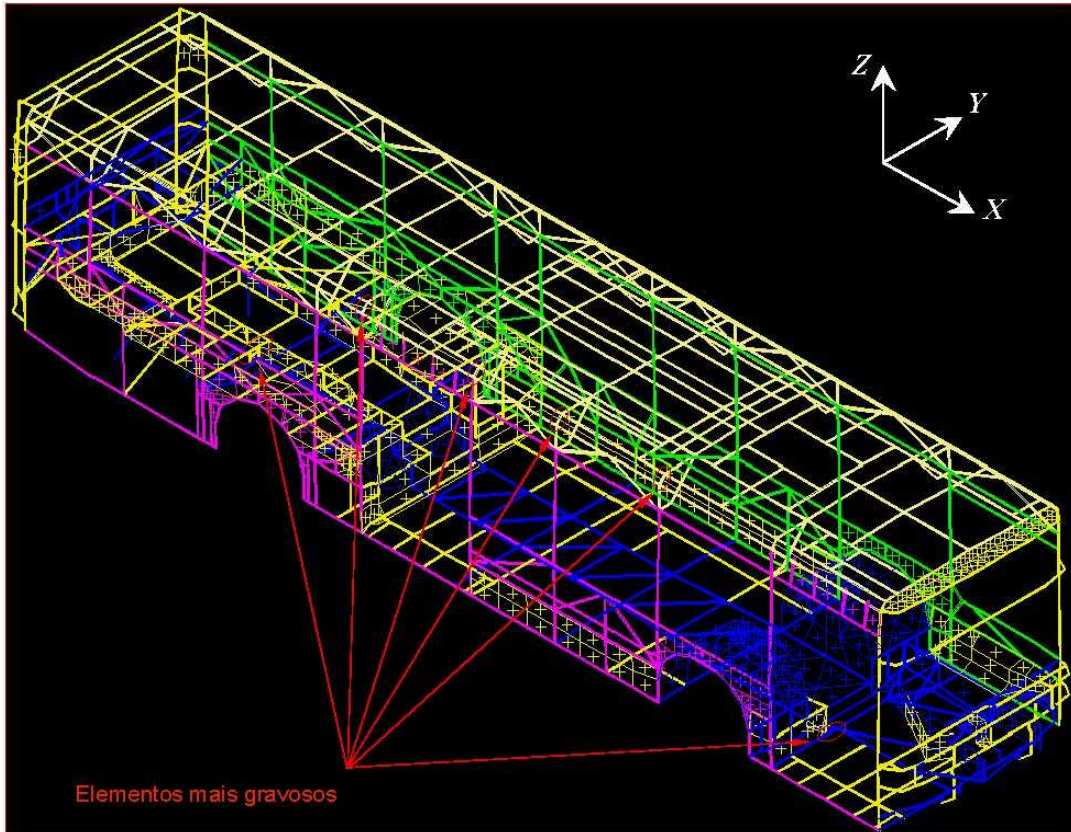
- *Peso próprio e dos ocupantes*
- *Solicitações dinâmicas na aceleração, travagem e mudanças de direcção;*
- *Solicitações devidas a acelerações verticais bruscas, ao passar sobre buracos no pavimento, ou ao subir passeios com as rodas;*
- *Solicitações devidas a embates ocasionais;*
- *Solicitações cíclicas induzidas pela vibração do motor, ou pelo percurso sobre um piso irregular;*
- *Solicitações de natureza térmica por influência da temperatura ambiente exterior e/ou interior, ou por influência da temperatura de órgãos mecânicos como seja o motor ou o radiador;*
- *Solicitações devido à força de arrasto (dependentes da aerodinâmica do veículo), entre muitas outras solicitações identificáveis.*

O estudo recai sobre a restrição em três pontos do autocarro simulando no pior dos casos, a subida de um passeio ficando uma das rodas da frente no ar. É ainda efectuada uma pesagem, ou seja a distribuição de peso por cada roda ou eixo por forma a comparar garantir uma descarga abaixo dos valores máximos permitidos pelo fabricante do chassis. Como a distribuição de massas não é simétrica é efectuado o ensaio para a roda da frente livre alternadas, como já vimos.

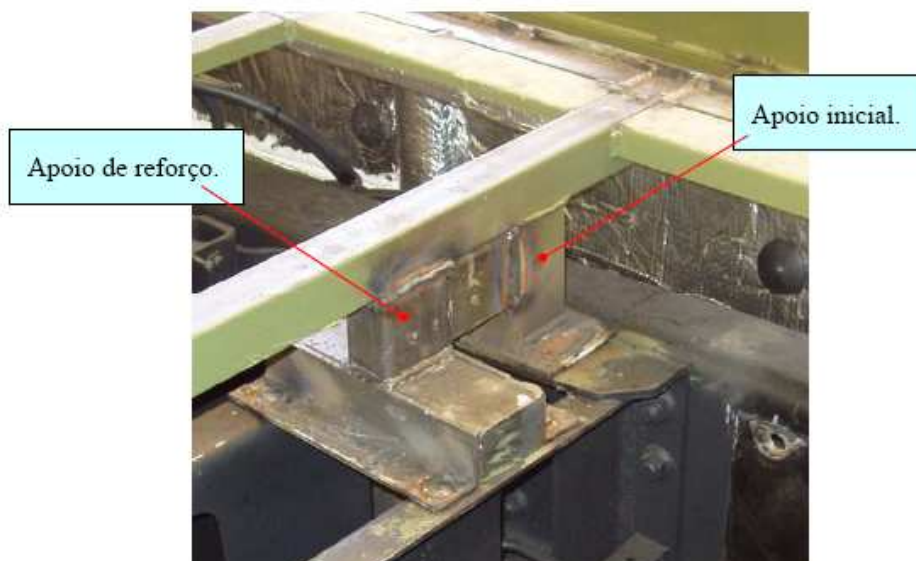
Na verdade não existe uma relação comprovada entre o valor real das tensões e o resultante da análise por elementos finitos. Torna-se assim uma análise mais qualitativa e menos quantitativa. Constata-se, em muitos anos de actividade, a inexistência de problemas a nível de pilares, que são por isso tomados como ponto de referência. Os elementos cujo valor de tensões esteja acima do valor dos pilares são tomados como pontos para melhoria. Esta foi a metodologia adoptada pelo aluno e em geral por todos os que se seguiram.

Em termos de resultados foram identificados e corrigidos três pontos de tensões cujos valores foram superiores aos dos pilares.

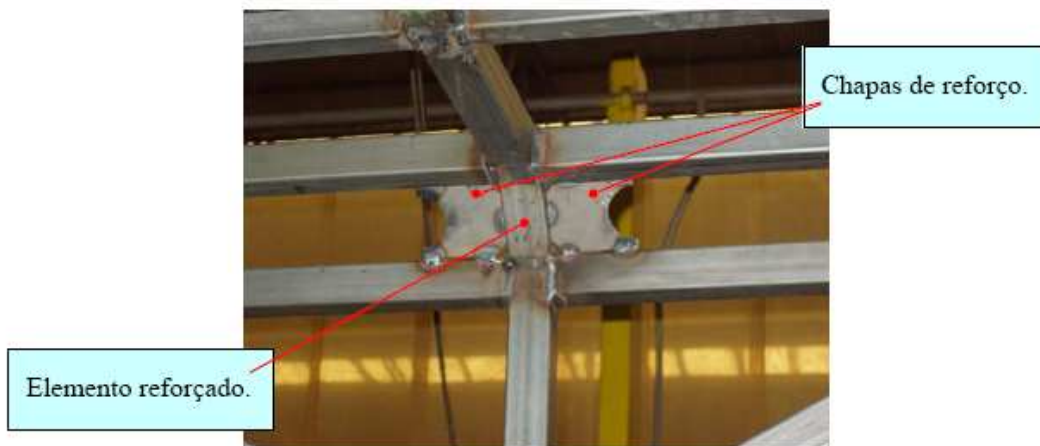
No relatório são referidos os três pontos:



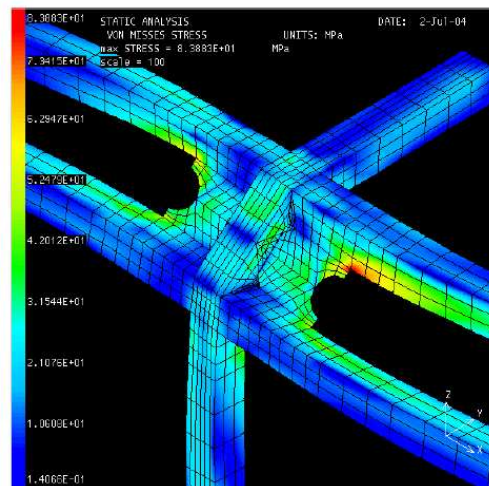
- Apoios do estrado.



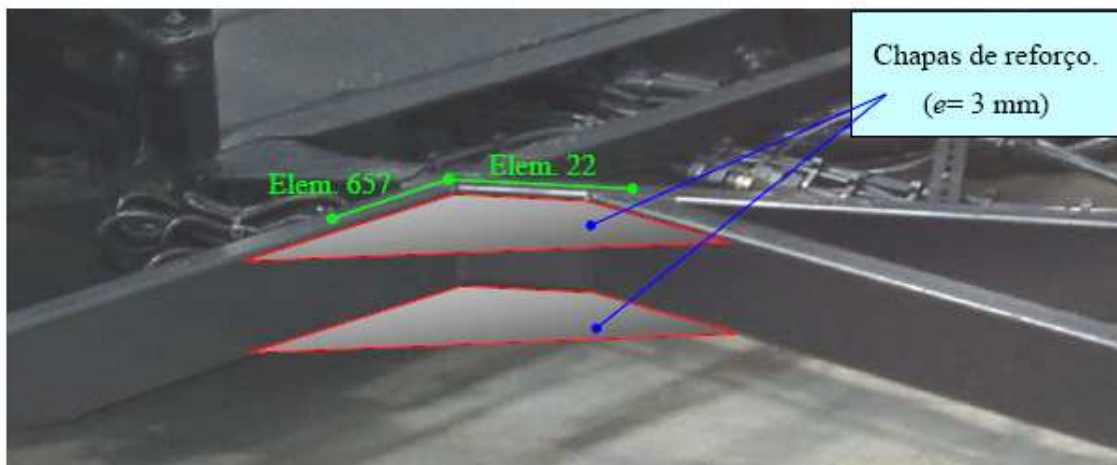
- Ligações Pilar Tejadilho



O estudo deste reforço incluiu uma análise mais pormenorizada utilizando simulando a ligação em StressLab com os devidos esforços utilizando elementos tipo sólido.



- Chassis



Neste caso o aluno calculou os reforços considerando que o StressLab aplica o reforço de chapa a nível das fibras neutras e que por essa razão o momentos de inércia do reforço real seria igual ao do das duas chapas utilizadas na realidade. Utilizou um artifício que para efeito de cálculo considero válido, sendo mais uma das soluções

encontradas pelo aluno. No entanto poderia ter recorrido ao cálculo dos reforços localizado anteriormente.

Nota: Possivelmente foi o mentor e com todo o mérito deu luz ao trabalho enquanto estagiários.

Há no entanto que enunciar alguns pontos que parecem importantes. Não verificando o posicionamento dos centros de gravidade dos módulos da frente e de trás do chassis é possível que incuta algum erro nos resultados, pois considerou-se anteriormente a importância do posicionamento correcto do centro de massa.

A substituição do peso dos bancos por forças leva a que na análise dinâmica a influência dos bancos não viesse acrescida, note-se que o peso de um banco duplo bancos perfaz 136Kg.

Um dos pontos que não identificados é a utilização de um factor multiplicativo de forma a obter a tara do veículo já que como é óbvio na modelação não são quantificados peso de componentes como cabos eléctricos, condutas, revestimentos interiores etc.

## André Ramos (2006-2007)

Iniciou o seu estudo pela análise de um módulo de autocarro, o Projecto LiteBus: “Modular Lightweight Sandwich Bus Concept”, parceria entre o INEGI, MAURI, SUNSUNGDEG, CAETANOBUS, UMP-INSIA entre outros.

Este projecto surge da necessidade crescente em mudar a forma como nos deslocamos. A preocupação crescente com o ambiente da EU obriga a indústria transportadora “preocupar-se” com as emissões crescentes de poluentes resultantes da combustão dos hidrocarbonetos e constituintes da gasolina. A segurança imposta por entidades competentes através do Regulamento ECE 66 leva ao projecto de autocarros mais “leves” e mais seguros. O aparecimento de novas materiais (sandwich e híbridos) desperta a indústria oferecendo grandes potencialidades e vantagens face aos materiais geralmente utilizados.

Passará pela concepção de um módulo representativo de um autocarro em aço/alumínio que servirá para determinar os requisitos e propriedades físicas que devem ser respeitadas por uma estrutura idêntica em materiais compósitos.

Os objectivos do projecto foram, [2] pág. 16:

- *Redução de cerca de 60% do peso correspondente à estrutura, que se traduz numa diminuição de 20-25% do peso total do veículo (em comparação com a estrutura normalmente em aço/alumínio) através do desenvolvimento de novas tecnologias e novos conceitos que substituem a arquitectura actual de um veículo de transporte urbano, recorrendo a materiais compósitos que respeitam os requisitos referidos anteriormente. Porém a rigidez da nova estrutura terá de ser equivalente à comumente utilizada;*
- *Redução dos custos de produção de veículos de transporte público terrestre, através do aperfeiçoamento de métodos de produção que visam reduzir tempo de fabrico (em cerca de 30%), numero de componentes e que permitem reparação fácil, bem como a reciclagem no fim de vida útil dos componentes;*
- *Desenvolvimento do conceito de transporte urbano de elevada qualidade com redução em 20% de ruídos (devido a vibrações), aumento da segurança dos passageiros e pedestres, que contribuem para a actual necessidade de mudança de transporte individual para público;*
- *Contribuir para o desenvolvimento do conhecimento na modelação de veículos de passageiros recorrendo a Método do Elementos Finitos (MEF);*
- *Desenvolvimento de software e ferramentas de análise de dano (impacto e fadiga) em materiais compósitos, com base em estruturas sanduíche.*



No caso o objectivo deste trabalho inicial recai sobre 5 assuntos, [2] pág. 25:

- *Rigidez Torsional;*
- *Deslocamentos máximos;*
- *Formas Naturais de Vibração – Estudo do Fenómeno de Ressonância;*
- *Energia de deformação;*
- *Distribuição e concentração do peso.*

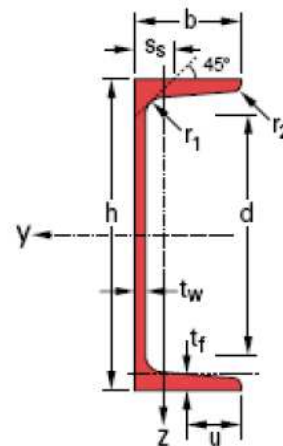
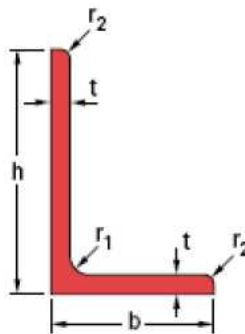
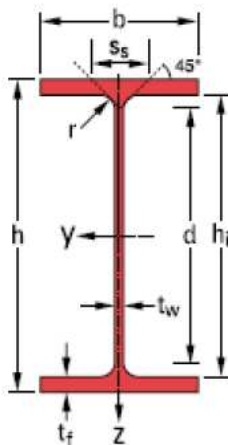
O cálculo dos deslocamentos máximos, rigidez torsional e comportamento dos elementos foi calculado estaticamente. As frequências naturais de vibração e, fenómenos de ressonância e energias de deformação são determinadas por análise dinâmica.

Um dos estudos do André Ramos recai sobre o estudo da Inércia Torcional, parâmetro necessário para o cálculo da tensão de corte.

Muitos dos perfis são normalizados, sendo por isso tabelados. Acontece que como já vimos anteriormente que muitas vezes é necessário calcular este parâmetro já que nenhum programa utilizado o calcula directamente.

O André Ramos calcula o Momento de Inércia Torsional utilizando a Analogia da Membrana de Prandtl para perfis rectangulares ou quadrados ou perfis abertos, que geralmente se encontra descrita em livros de Resistência dos Materiais ou mesmo recorrendo a tabelas de perfis normalizados.

$$I_t = \frac{2}{3} \cdot (b - 0,63 \cdot t_f) \cdot t_f^3 + \frac{1}{3} \cdot (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^3 + 2 \left( \frac{t_w}{t_f} \right) \left( 0,145 + 0,1 \frac{r}{t_f} \right) \left[ \frac{\left( r + \frac{t_w}{2} \right)^2 + (r + t_f)^2 - r^2}{2 \cdot r + t_f} \right]^4$$



Recorreu ainda ao software Cosmos (ferramenta do SolidWorks) para determinar a Inércia Torsional determinando a rotação e calculando a Inércia Torsional através da rotação calculada através do deslocamento relativo de um ponto na face do elemento de viga em torno do seu eixo, sendo o Momento Torsor, Módulo ao Corte e comprimento conhecidos.

$$\theta = \frac{M_t L}{GI_t}$$

Onde;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$I_t$  – Momento de Inércia Torsional

$G$  – Módulo ao corte

$L$  – Comprimento do perfil

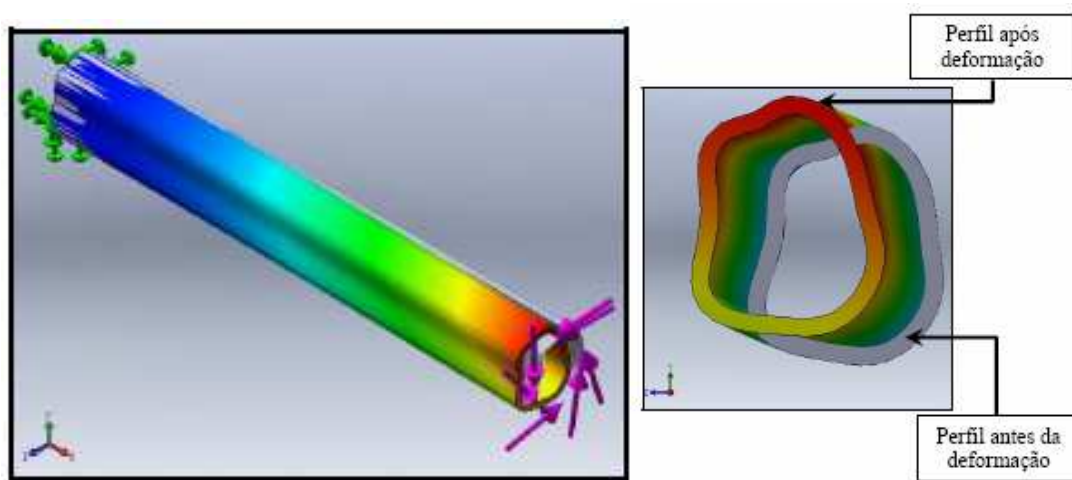
$M_t$  – Momento Torsor

$\theta$  – Ângulo de Rotação

Chegou a conclusões, que considero importantes referir, [2], pág. 25:

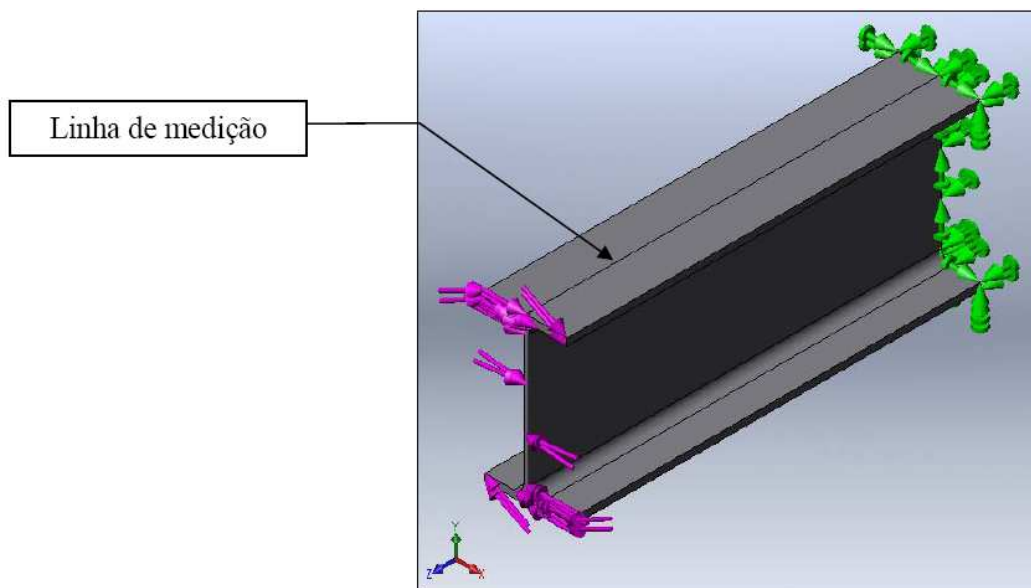
- *O sentido do não  $M_t$  afecta os resultados mesmo em perfis não simétricos;*
- *Não deve ser aplicado  $M_t$  de pequena intensidade porque origina valores falseados devido à capacidade de cálculo e série de truncatura do computador;*
- *A gravidade não deverá ser incluída na simulação em SW-Cosmos porque a propriedade física da  $I_t$  é intrínseca do elemento resistente e é devido apenas à torção. A inclusão da gravidade na simulação iria originar deslocamentos que se iriam somar aos de torção, falseando os resultados;*
- *Em perfis que não possuem eixos de simetria em relação ao centro de massa temos de ter atenção que a face extrema onde é aplicado o  $M_t$  não se mantém alinhada com a outra face na qual se aplica a restrição, por existir massa/área desigual em relação aos eixos de inércia. Por este motivo, o deslocamento angular a ser medido deverá ser relativo a um eixo longitudinal que se mantém alinhado com as duas faces extremas. Assim, será necessário escolher dois pontos homólogos e medir os deslocamentos de cada um, calculando a  $I_t$  considerando o deslocamento relativo desses dois pontos*



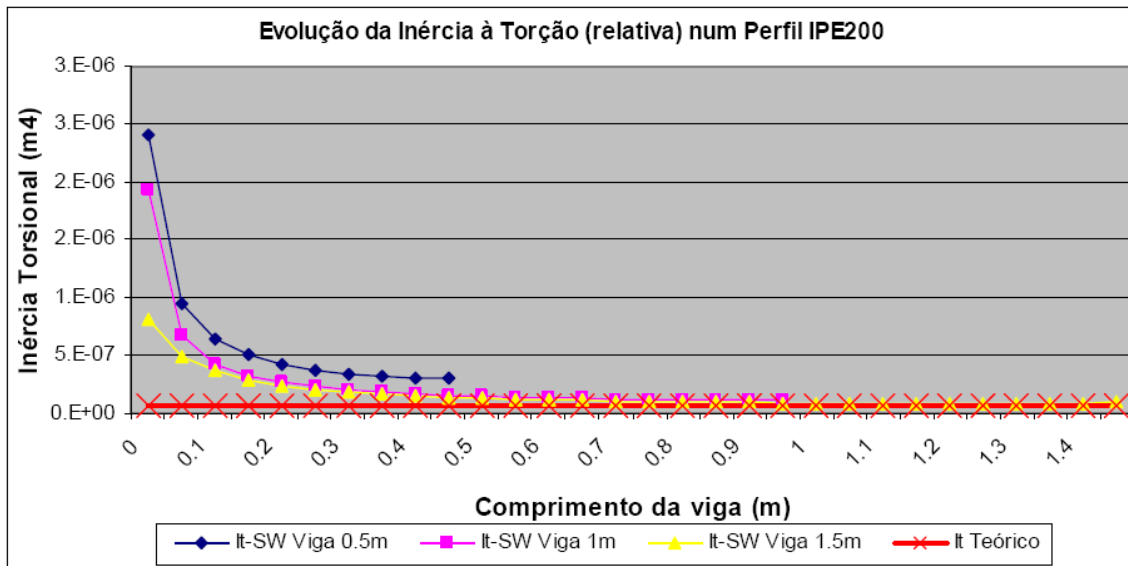


Referiu o fenómeno de *warping* (para elementos abertos tipo I,L;C) como consequência de tensões de corte devido a cargas excêntricas provocando uma distorção da face onde é aplicado o momento face à do encastramento gera erros de cálculo do Momento de Inércia Torsional. Erros esses que poderão ser minimizados com a utilização de uma chapa de topo.

Faz o estudo de uma viga I conduzindo o estudo face a influência do comprimento da viga no cálculo do Momento de Inércia Torsional. Considerou três comprimentos diferentes dividindo o IPE200 por fracções de comprimento.



Chegando assim ao seguinte gráfico, Inércia Torsional vs Comprimento:



Refere relativamente ao gráfico que, [2] pág. 29:

- *Numa primeira zona, independente do comprimento da viga, o encastramento do perfil resistente tem grande influência no valor do parâmetro a determinar. Assim verifica-se que quanto mais rígido for a ligação ao exterior, menor será o deslocamento angular e consequentemente maior será a  $I_t$ . Este efeito tende a atenuar com o comprimento do perfil.*
- *O comprimento considerado para a análise do perfil tem grande influência no resultado, quanto maior for o comprimento mais  $I_t$  se aproxima do valor tabelado. Não fazia sentido considerar comprimentos superiores a 1,5m porque em toda a estrutura do módulo representativo não encontramos perfis inteiros com comprimentos superiores.*
- *A escolha da linha de medição referida permite minimizar o efeito da distorção da face extrema, que se traduz numa melhor aproximação do valor teórico.*

Conclui que a utilização do Método de Elementos Finitos produz resultados superiores aos calculados por fórmulas empíricas, não abstando de alguma considerações para alguns casos como vimos anteriormente. Na verdade refere-se à ausência de conhecimento da proveniência, bem como à não consideração das Tensões de Corte provocados por Momentos Torsores nas zonas de concordância, alteração da forma ou espessura do perfil usadas nas formulas empíricas fundamentando a utilização de ferramentas de cálculo de elementos finitos, nomeadamente o Cosmos.

A análise do Módulo de Autocarro LiteBus teve como modelo de comparação um autocarro urbano anteriormente modelado pelo aluno António Morais. Assim obteve um módulo modelo para comparar com o LiteBus obtendo assim três modelos.

Considerou-se a zona dos vidros (entre eixos) de forma a evitar a porta traseira para o modelo urbano para se obter uma comparação mais válida. As condições

fronteira e cargas foram consideradas acima da bagageira para o LiteBus (modelo de turismo) e a zona inferior do urbano, como forma de “igualar” modelos.

O aluno conclui que o módulo LiteBue é mais rígido que o módulo urbano devido à maior robustez resultante da existência da estrutura da bagageira.

Na análise dinâmica admite que para 3 apoios o comportamento é idêntico no entanto para 4 apoios o modelo LiteBus apresenta maior tendência flexão transversal apresentando pois menor energia de deformação para a mesma solicitação.

O aluno realça ainda que, [2] pág. 39:

- *O modelo de simulação do módulo LiteBus pode ser considerado válido, uma vez que forneceu resultados muito idênticos aos obtidos para o módulo representativo do modelo de autocarro urbano.*
- *A análise estática, que permitiu determinar principalmente a Rigidez Torsional da estrutura, possibilitou concluir que um módulo representativo de um modelo de autocarro não é de facto representativo do autocarro completo, pelo menos em termos do parâmetro referido.*
- *O estudo realizado também permite estimar os esforços a que todos os elementos resistentes da estrutura do módulo representativo da CaetanoBus estão sujeitos, em situações passíveis de serem simuladas.*
- *A análise dinâmica permite retirar conclusões bastante úteis sobre comportamento da estrutura, quando sujeita a cargas cíclicas, que podem ser, por exemplo, funcionamento do motor.*

Revelando-se este estudo importante na redução de peso, diminuição da densidade dos materiais mantendo a sua rigidez, nunca esquecendo fenómenos de Ressonância.

Um dos aspectos importantes a considerar é relativa à redução de peso. Analisando a Frequência Natural de Vibração:

$$w^2 = \frac{k}{m}$$

Com:

$w$  – Frequência Natural de Vibração  
 $k$  – Rigidez característica do sistema  
 $m$  – Massa do sistema

Se a Frequência Natural de Vibração se aproximar do regime de frequências de vibração do motor ocorre o risco da estrutura vibrar só pelo simples do motor estar em funcionamento.

A segunda parte do trabalho consistia em modelar um autocarro de turismo de forma a detectar pontos considerados fracos utilizando a mesma analogia, descrita anteriormente, utilizada pelo aluno António Morais.

Foi modelado um de dois eixos modelo Levante, cuja carroçaria é produzida pela CaetanoBus.

As etapas previstas, tal como o aluno António Morais, englobaram uma análise da estrutura resistente e melhoria de alguns pontos fracos. No caso tentaram ainda uma redução de peso nunca esquecendo a relação Frequência Natural de Vibração e Regime do Motor.

Ao contrário do Morais validou em termos de posicionamento o centro de gravidade do chassis, levando assim a resultados que no meu entender são mais fidedignos já que o comportamento em flexão depende da posição das cargas.

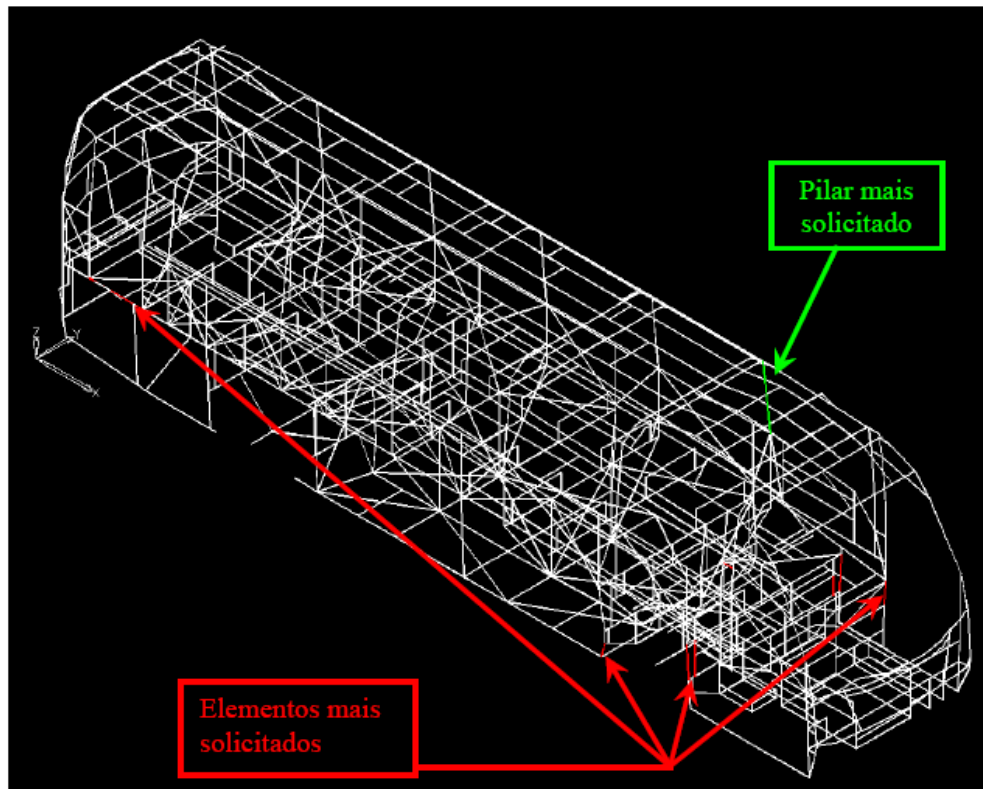
Identificou ainda um factor multiplicativo de forma a obter o peso correcto, pois como já vimos há componentes não estruturais não modelados que contribuem com peso próprio, e portanto tem que ser contabilizado.

Uma das conclusões foi o facto de existirem erros associados à modelação produzindo valores de descarga por eixo diferentes dos medidos na realidade. Aponta no entanto três causas possíveis, [2] pág. 68:

- *Definição da geometria em Cadds5;*
- *Definição das propriedades físicas dos elementos;*
- *Orientação dos eixos locais dos elementos que definem as orientações de maior e menor inércia do perfil.*

O tipo de solicitações referidas são os mesmos a que o aluno António Morais nos havia descrito referindo apenas que as situações de solicitação são inúmeras e tendo a tendência apenas para considerar as críticas, porém poderão nunca ser verificadas. Calculou ainda a Rigidez Torcional pelo método anteriormente descrito, aplicando uma força num dos apoios, determinando o deslocamento e calculando assim a rotação. Determinou as frequências naturais de vibração verificando valores longe das frequências de vibração típicas de um motor diesel com as mesmas características.

Com a posição do centro de massa dos módulos do chassis garantido através do cálculo foram identificados alguns pontos que foram melhorados, [2] pág. 77 e 80:



**Elemento (s)/Zona:** Pilar da porta automática da frente.

**Solicitações:** Esta zona é bastante solicitada devido ao peso da porta automática. De forma a diminuir as tensões de flexão decidiu-se reforçar este pilar, paralelamente segundo o eixo vertical com um perfil idêntico ao que existe.

**Modificação:** Reforçar pilar com perfil 50.50.3 paralelo, desde do nível do estrado até plataforma de entrada.



**Elemento (s)/Zona:** Ligação entre pilares da porta do motorista

**Solicitações:** Os esforços predominantes são os verticais que provocam tensões elevadas segundo o eixo (global) transversal ao autocarro (yy). Para reforçar nesta direcção a geometria foi modificada com um perfil de maior altura e com inércia superior.

**Modificação:** Modificar de 50.50.3 para 60.50.3.



**Elemento (s)/Zona:** Zona da porta de emergência traseira no painel direito.

**Solicitações:** Devido à existência da porta de emergência esta zona apresenta-se menos resistente e para reforçar a solicitações verticais (sistema global) que provocam esforços de flexão (yy) decidiu-se reforçar esta zona, paralelamente com um perfil idêntico.

**Modificação:** Adicionar perfil 50.50.3, na direcção longitudinal e apenas na zona referida.



**Elemento (s)/Zona:** Ligação entre prumos dos painéis laterais e estrado, na zona do chassis, dos dois lados do autocarro.

**Solicitações:** Nesta zona a ligação do estrado aos painéis revela-se bastante insuficiente. Para a reforçar decidiu-se colocar chapas de reforço e prolongar os perfis dos painéis laterais, de forma a aumentar a eficácia da ligação entre os componentes envolvidos.

**Modificação:** Colocar chapas de 2mm entre os perfis verticais de ligação entre estrado e chassis de cada lado para formar “caixão” e aumentar inércia resistente, no conjunto. Prolongar os perfis dos painéis.



**Elemento (s)/Zona:** Ligação entre prumos dos painéis laterais e estrado, na zona da bagageira.

**Solicitações:** De forma a reforçar esta zona optou-se por prolongar a chapa já existente do chassis para aumentar a inércia do elemento vertical, pelo menos numa das direcções (yy- Global).

**Modificação:** Prolongar chapa no chassis até ao fim dos prumos dos painéis.



As alterações efectuadas garantiram a diminuição das tensões nestes elementos, garantindo assim um dos objectivos propostos.

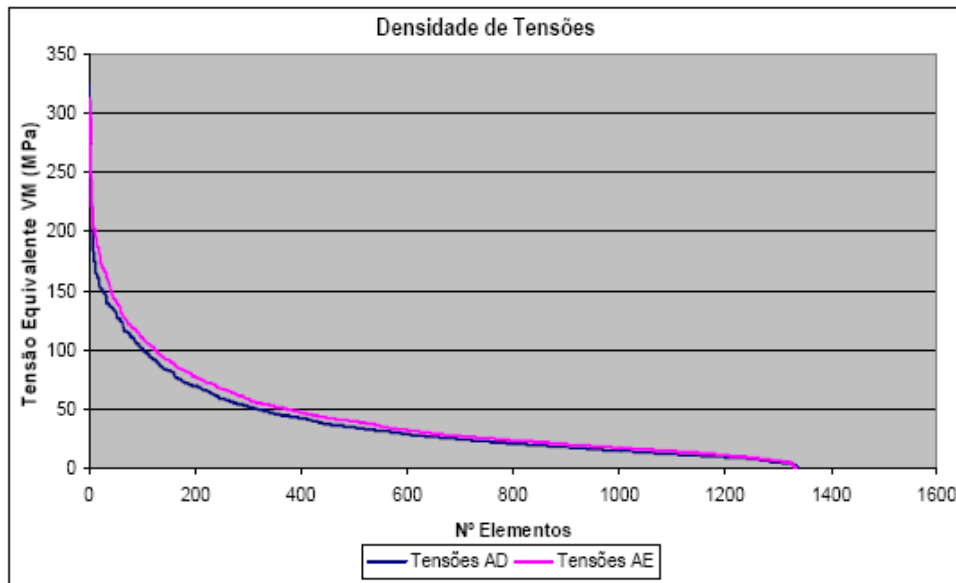
A necessidade de reduzir peso levou o aluno a adoptar uma estratégia para o efeito. A verdade é que a redução de peso deveria ser ponderada pela razão acima descrita, mas também que a estrutura resistente representa 14,28% da Tara do veículo ou mesmo porque influência toda a distribuição de tensões.



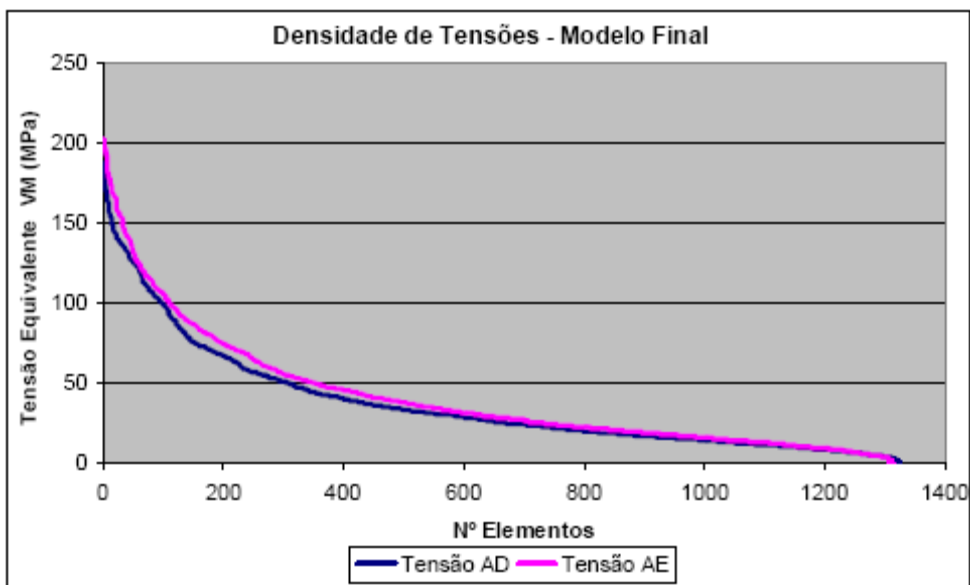
As acções de redução de peso consistiram num aligeiramento ou mesmo substituição de alguns perfis menos solicitados. Ocorreram nos painéis laterais, estrado e no tejadilho onde alguns perfis foram substituídos por um mais resistente.

Após as acções de melhoria, a distribuição dos níveis de tensão mantiveram-se similares aos iniciais garantindo assim um dos objectivos de redução de peso.

Antes:



No final:



### **Tiago Lopes (2006/2007)**

O estudo realizado por T. Lopes, [3], no mesmo semestre com A. Ramos, [2], teve como objectivo modelar por MEF a estrutura metálica de um autocarro. O trabalho, abrange os mesmos objectivos descritos por A. Ramos, [2], no entanto o modelo estudado difere no número de eixos do rodado, dois na retaguarda.

A utilização de um eixo equivalente na retaguarda, previsto pelo fabricante, permitiu simplificar a modelação alguns eliminando algum erro nos resultados. Os resultados obtidos foram similares aos de A. Ramos, [2].

Refere a importância do estágio quer para a empresa quer para o autor em termos de conhecimento mas também a importante relação e a nível pessoal.

Faz referência em anexos à história e à formulação de elementos finitos. Aborda os elementos de viga, cascas e placas bem como a Analogia da Membrana e Hidrostática entre outras.

### **Pedro Oliveira (2003)**

O trabalho deste aluno recaiu sobre a aplicação de uma nova ferramenta de desenho 3D aplicada à indústria de fabrico de componentes para autocarro. O objectivo, segundo o aluno, seria utilizar o software PRO/ENGINEER para “*melhorar substancialmente o processo produtivo na área de modelação de componentes*”, [4] pág. 3.

O aluno descreve a empresa bem como os produtos que produz, sendo o seu trabalho não de elementos finitos, isto é cálculo estrutural, mas sim de desenvolvimento inicial. Descreve a importância deste tipo de software no auxílio à Concepção e Desenvolvimento permitindo uma melhor “*idealização*” do produto, facilitando a criação de “*desenhos e listas de peças*” ou em questões de “*montagem ou normas e legislação em vigor*”, [4] pág. 3.

Refere ainda a importância da ferramenta no Design afirmando procurar “*o equilíbrio entre a forma e a função*” e “*reforçar as ligações entre a concepção e a produção*”, [4] pág. 12 como uma das razões da utilização deste tipo de ferramenta. Um outro objectivo é a obtenção de desenhos técnicos 2D através dos modelos criados em 3D tornando o processo produtivo mais rápido.

Descreve ainda o software como sendo similar a muitos outros nomeadamente o SolidWorks, Inventor, ou o Catia. Refere-se ao programa como “*versátil, funcional e eficiente*”, [4] pág. 23, quanto os outros conhecidos embora pareça menos fácil de usar.

A importância deste trabalho prende-se com a necessidade especial de dar a possibilidade a pessoas fisicamente incapacitadas de utilizarem este tipo de transportes. Este tipo de software torna-se importante na gestão de espaços pois permite a verificação de interferências e condições de utilização.



Uma Plataforma elevatória permitirá a uma cadeira de rodas "subir" a um autocarro. A plataforma é fornecida à CaetanoBus e portanto foi modelado pelo aluno, no entanto parte da plataforma, já desenhada em CADD5, foi importada do ficheiro existente. No entanto alguns problemas surgiram tais como "*sobreposição de linhas e cotas, descontinuidades geométricas pontuais que tornavam as secções abertas quando aparentemente estariam fechadas*" , [4] pág. 16. A única forma encontrada para resolver foi editar e alterar o desenho de forma a simplificar em termos de cotação e eixos de simetria por exemplo, o desenho 2D.

Uma das questões que é importante referir assenta no planeamento. É um facto que o projecto serve para definir, projectar e afinar o produto. Como tal também o aluno passou pela dificuldade da alteração de desenho das partes constituintes da plataforma. Um planeamento eficaz permite posteriormente alterações mais fáceis e rápidas.

O trabalho passou pela medição directa do mecanismo de elevação pois geralmente os fabricantes não fornecem todas as cotas necessárias passando para a modelação.

Criou peças necessárias tais como:

- Suporte para o mecanismo de elevação;
- Suportes de fixação da caixa da plataforma.

Modelou ainda um vidro da porta da frente e pára-brisas baseando-se nas curvas tridimensionais dos pilares. Criou ainda um modelo de um tejadilho de forma a demonstrar a simplicidade como o programa funciona. O ficheiro pode ser criado como um assembly podendo cada uma das partes constituintes ser alterada alterando assim automaticamente o ficheiro de assembly (tal como no SolidWorks).

Refere ainda, tal como os restantes alunos, faz uma introdução ao programa, bem como apresenta algumas características do programa, cujo relatório penso existir na Biblioteca da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto ou possivelmente numa base de dados na web.

Nota: Penso ter sido um trabalho muito interessante visto a interacção e o trabalho prático executado. A engenharia não se resume a um computador e uma secretária mas também a componente prática e as relações humanas entre todos os trabalhadores.

## **Referências Bibliográficas**

[1] - Optimização do Projecto da estrutura de autocarros com software de “Computer Editing Engineering”, António Domingos Araújo Morais, FEUP, CaetanoBus, 2004

[2] – Projecto Fim de Curso, André Ramos, FEUP, CaetanoBus, 2006/2007

[3] - Análise por MEF de uma Estrutura Metálica de um Autocarro de Turismo de Três Eixos, FEUP, CaetanoBus, 2006/2007

[4] – Modelação 3D de Componentes de Autocarro, Pedro Oliveira, FEUP, CaetanoBus, 2003